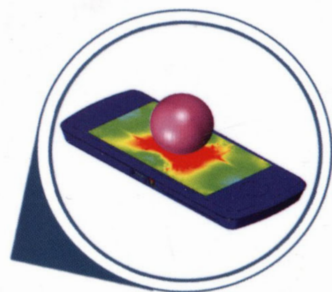
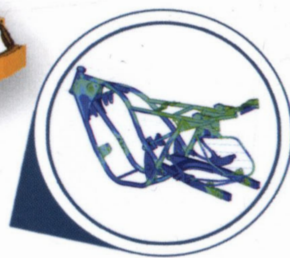
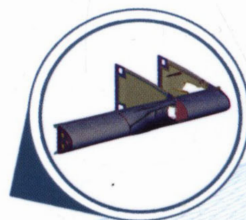
HyperWorks进阶教程系列

RADIOSS 理论基础与工程应用

欧贺国 方献军 洪清泉 等编著




附赠超值 DVD 光盘

- 全书练习实例模型文件+视频讲解
- Altair中国HyperWorks技术大会论文集




机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

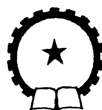
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

HyperWorks 进阶教程系列

RADIOSS 理论基础与工程应用

欧贺国　方献军　洪清泉　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书主要介绍了 RADIOSS 的理论方法、基础练习、使用技巧和工程应用。

本书的主要内容包括 RADIOSS 有限元求解器介绍、线性静力分析、非线性静力分析、线性屈曲分析、RADIOSS 惯性释放分析、模态分析、频率响应分析、瞬态响应分析、响应谱分析和随机振动分析、热-热力耦合分析、疲劳分析、NVH 分析、RADIOSS Block 概述、显式非线性基本理论、常用单元类型、材料与失效模型、运动约束、接触、气囊模型、SPH 和 ALE 求解流固耦合问题、RADIOSS Block 隐式分析。

本书中实例所涉及的模型文件和结果文件，读者可在随书附赠的光盘中找到。

本书由 Altair 中国公司技术团队编写，是 Altair 中国公司推荐的 HyperWorks 软件培训用书，适合机械、汽车、航空航天、船舶、军工、重型装备、电子及家电等相关行业工程技术人员的自学或参考，也可作为理工院校相关专业师生学习或者教学用书。

图书在版编目（CIP）数据

RADIOSS 理论基础与工程应用 / 欧贺国，方献军，洪清泉编著．—北京：

机械工业出版社，2013.3 (2016.4 重印)

HyperWorks 进阶教程系列

ISBN 978-7-111-41577-0

Ⅰ．①R…　Ⅱ．①欧…　②方…　③洪…　Ⅲ. ①有限元分析－应用软件－教材 Ⅳ．①0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 033774 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：丁　诚　张淑谦

责任编辑：张淑谦

责任印制：邓　博

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2016 年 4 月 • 第 1 版 • 第 2 次印刷

184mm×260mm • 33.25 印张 • 822 千字

4001－4500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-41577-0

ISBN 978-7-89433-829-7（光盘）

定价：99.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：（010）88361066	教 材 网：http://www.cmpedu.com
销 售 一 部：（010）68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：（010）88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203	封面无防伪标均为盗版

序　一

Altair 公司于 1985 年从工程咨询起家，在 1989 年发布了 HyperMesh 软件，并很快在汽车业得到广泛认同，从此激发了 Altair 在软件上投入的热情。1994 年，Altair 推出了 OptiStruct 模块，当年即获得《工业周刊》（Industry Week）年度技术奖。随后的几年，Altair 通过收购和开发，扩展了一系列模块，并于 1999 年整合成 HyperWorks 软件包。在 2006 年收购 RADIOSS 软件后，Altair 终于在结构仿真和优化方面形成了完整的产品系列。

2012 是 Altair 进入中国的第 11 个年头，在这 11 年中，在 Altair 中国同仁的不懈努力下，Altair 中国业务有了长足的发展，HyperWorks 用户群也逐渐壮大。为此，2007 年开始，我们每年举办 HyperWorks 技术大会（HTC）暨 Altair 用户年会。在会上，不仅有大会主题发言，还有大量的用户论文交流。2007 年，上海的第一届 HTC 大会就收到了 70 多篇论文，大部分是关于 HyperMesh 的应用。2008 年，在北京的第二届 HTC 大会上开始有一些制造仿真技术（HyperXtrude/HyperForm）方面的论文。2009～2010 年，在上海的第三、四届 HTC 大会上论文数都超过了 120 篇，内容涵盖的行业更广，应用的模块更多，涌现了大量的有限元求解、多体动力学仿真（MotionSolve）、优化设计及二次开发的成功案例。

Altair 早些年的成功基本上得益于好的产品以及技术人员的口口相传。Altair 的业务模式也为 HyperWorks 的普及提供了强有力的支持，使得高端 CAE 的进入门槛大大降低。随着业务的飞速发展，要求使用 HyperWorks 的技术人员也越来越多，大家迫切希望有一些更好的教程，能帮助他们更快地上手、更系统地学习、更深入地应用。在这样的背景下，我们组织编写了 HyperWorks 进阶教程系列：《HyperMesh & HyperView 应用技巧与高级实例》、《OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用》、《RADIOSS 理论基础与工程应用》，以满足广大 CAE 工程师及爱好者的要求，并帮助高校学子更快掌握 HyperWorks 的软件应用。

无论您是新入行，还是已在这一行工作多年，您一定会为 CAE 工具的多样化伤透脑筋。HyperWorks 在高端 CAE 技术上提供了一站式解决方案，不仅使系统精简，同时又可同其他系统共享 CAE 模型，更进一步将目前的主流 CAE 求解器集成在统一的环境上，组成一个高效的产品研发平台，从而将创新、成本、效率有机结合起来，构造最有效的产品创新设计平台解决方案。Altair“以用户的成功衡量我们的业绩”的服务理念、不断创新的技术和业务模式、全球工程咨询经验的导入，会助您更上一层楼！

戚国焕
Altair 大中华区总经理

序　二

RADIOSS 是碰撞数值仿真领域成熟的有限元软件之一。在 20 世纪 70 年代，碰撞仿真仅使用梁和非线性铰单元进行，难以预测结构的实际行为。在 20 世纪 80 年代，板壳单元和接触算法被引入到管结构的碰撞预测中来。动态非线性守恒方程可以通过隐式或显式数值方法进行时间积分，因为难以解决高度非线性接触下的收敛问题，隐式方法不能处理后屈曲问题。显式时间积分和减缩积分壳单元的使用，以及超级矢量计算机（CRAY）的出现，促成了工业界第一次碰撞仿真的进行。在此背景下，针对向量计算机进行优化，并使用向量编程的有限元软件 RADIOSS 诞生了。

工业界第一个汽车碰撞模型仅有 6,000 单元，因此其精度不高，结构的吸能情况被高估。今天碰撞模型的规模大致是第一个汽车碰撞模型的 1000 倍，使用的基本方法是相同的，当然也有很多改进和增强。例如，接触搜索的八叉树算法代替桶排序算法，壳单元使用一个积分点与非对称模式的解析集成，恒定积分时间步长技术的开发，新的材料本构模型。同时，还有很多新的建模技术被开发出来，如焊点模型、风窗玻璃、发动机悬置、气囊展开……，汽车的每个零部件都形成了它们自身的最佳建模技术。

今天，RADIOSS 已经不仅仅是碰撞仿真软件，它能够求解应用力学领域许多的非线性问题，如高速冲击、准静态非线性问题、制造过程（如冲压）、流固耦合等。对于结构碰撞仿真，RADIOSS 包含高效而精确的壳单元公式、接触算法、考虑材料与几何非线性的拉格朗日类型材料模型。RADIOSS 还有任意拉格朗日欧拉（ALE）格式、准静态非线性隐式积分格式、广泛的单元公式和百余种材料模型用于模拟延性和脆性材料、复合材料、流体和泡沫等，同时 RADIOSS 还提供了大量高级的材料失效模型。

RADIOSS 求解器现在已经完全集成到 HyperWorks 软件里，从而能够更有效地进行前后处理，更方便与优化迭代或敏感性分析进行集成，并与行业应用进行了深度集成。目前 RADIOSS 的开发集中在新的计算平台构架的可扩展性以及算法的精确性和稳健性。大量的工业应用实践证明 RADIOSS 是一个有效的设计预测工具。

Francis Arnaudeau
Altair CTO 兼 RADIOSS 开发团队管理总监

前 言

技术支持和服务是 Altair 公司的核心竞争力之一。从 2001 年开始 Altair 公司就建立了技术团队，为客户提供快速而全面的软件售前、售后技术支持，把 Altair 全球产品创新技术和工程咨询经验带给中国市场。过去十年，正是 CAE 技术引领国内广大制造业企业进行产品创新设计，提升产品竞争力的十年。Altair 中国恰逢其时，以其企业级 CAE 驱动创新平台 HyperWorks 助力中国制造业自主创新，共同成长。Altair 公司见证了许多国内汽车 OEM 厂家的 CAE 队伍从几人到几十人、上百人的发展历程；参与了 HyperWorks 在国内航空航天、电子、船舶、轨道交通、重型机械、军工等行业众多型号和产品上的成功应用；与各企业、科研院所、高校的 CAE 工程师和学生相互学习，共同为提高中国 CAE 技术应用水平而努力。

十年弹指一挥间，Altair HyperWorks 软件已从 V5.0 发展到 V11.0，中国技术团队也已发展到 50 多人。Altair 公司在为客户服务的过程中，积累了大量的软件技巧和工程经验，同时也发现许多工程师和学生苦于目前市场上关于 HyperWorks 的中文书籍很少，只能通过一些有限的渠道进行学习和交流，因此深感同广大 HyperWorks 使用者和爱好者分享技术和经验的重要性。

2011 年 6 月，Altair HyperWorks V11.0 正式发布，包含众多的新技术和新功能，为广大用户带来了超值的 CAE 技术体验。在 Altair 大中华区总经理戚国焕先生的支持下，Altair 公司决定以 V11.0 为基础，编写 HyperWorks 11.0 进阶教程系列丛书。本书介绍了 RADIOSS 求解器的基本理论方法及工程案例。

本书的主要内容包括 RADIOSS 有限元求解器介绍、线性静力分析、非线性静力分析、线性屈曲分析、RADIOSS 惯性释放分析、模态分析、频率响应分析、瞬态响应分析、响应谱分析和随机振动分析、热−热力耦合分析 RADIOSS 疲劳分析、NVH 分析、RADIOSS Block 概述、显式非线性基本理论、常用单元类型、材料与失效模型、运动约束、接触、气囊模型、SPH 和 ALE 求解流固耦和问题、RADIOSS Block 隐式分析。

本书主要由欧贺国、方献军和洪清泉编写。参与编写的还有 Altair 中国公司技术团队成员耿永宁、徐自立、张宁、袁山和武永甫。

由于编者水平有限，书中错误及不足之处在所难免，敬请广大读者不吝指正，也欢迎大家共同探讨，可发邮件至 info@altair.com.cn 进行联系。

Altair 中国技术团队

目　录

序一
序二
前言

第 1 章　RADIOSS 有限元求解器介绍 ······ 1

1.1 HyperWorks 软件的优点 ······ 2
1.2 RADIOSS 简介 ······ 2
1.3 RADIOSS Bulk Data 输入文件概述 ······ 4
1.3.1 RADIOSS Bulk Data 输入文件简介 ······ 4
1.3.2 I/O 选项和 SUBCASE 段使用指南 ······ 5
1.3.3 输入/输出文件类型介绍 ······ 7
1.3.4 单元介绍 ······ 7
1.3.5 材料介绍 ······ 8
1.3.6 有限元分析的结果 ······ 9
1.4 RADIOSS Bulk Data 分析流程及运行选项 ······ 10
1.4.1 RADIOSS Bulk Data 分析流程 ······ 10
1.4.2 RADIOSS 运行选项（Block 和 Bulk Data） ······ 10
1.5 本章小结 ······ 14

第 2 章　线性静力分析 ······ 16

2.1 静力分析基本理论及软件分析流程 ······ 17
2.1.1 静力分析基本理论 ······ 17
2.1.2 以 HyperMesh 为前处理的软件分析流程 ······ 17
2.2 线性静力分析实例 ······ 18
2.2.1 带孔方板的线性静态分析 ······ 18
2.2.2 自由体载荷提取技术（FBD） ······ 26
2.2.3 HyperBeam 的使用 ······ 41
2.2.4 接触分析 ······ 47
2.3 相关知识 ······ 56
2.3.1 剪切中心的定义及计算方法 ······ 56
2.3.2 在 HyperMesh 中为 RADIOSS Bulk Data 施加载荷 ······ 57
2.4 本章小结 ······ 61

第 3 章　非线性静力分析 ······ 63

3.1 非线性静力分析基本理论 ······ 64
3.1.1 非线性准静态 GAP 和接触

分析介绍 ……64
3.1.2 非线性求解方法 ……64
3.1.3 增量加载 ……65
3.1.4 非线性收敛性判别准则 ……65
3.1.5 非线性问题设置 ……66
3.1.6 非线性收敛注意事项……67
3.1.7 非线性分析工况定义示例 ……69
3.1.8 用户注意事项……71
3.1.9 几何线性分析和几何非线性分析的区别 ……72
3.1.10 隐式分析和显式分析的区别 ……73
3.2 非线性分析实例 ……76
3.2.1 弯板的非线性隐式分析 ……76
3.2.2 接触及弹塑性分析 ……82
3.3 本章小结 ……89

第4章 线性屈曲分析 ……90

4.1 线性屈曲分析基本理论 ……91
4.2 线性屈曲分析实例……92
4.2.1 细长杆的三维屈曲分析 ……92
4.2.2 机翼模型的三维屈曲分析 ……97
4.2.3 预载荷的屈曲分析 ……102
4.3 壳单元与实体单元连接方法介绍 ……103
4.4 本章小结 ……108

第5章 RADIOSS 惯性释放分析 ……109

5.1 惯性释放分析简介……110
5.2 惯性释放分析实例……111
5.3 RBE2 和 RBE3 介绍 ……116
5.3.1 RBE2 单元 ……116
5.3.2 RBE3 单元 ……117
5.4 本章小结 ……120

第6章 模态分析 ……121

6.1 模态分析基本理论……122
6.1.1 实特征值分析……122
6.1.2 复特征值分析……122
6.2 模态分析实例……123
6.2.1 支架的模态分析 ……123
6.2.2 白车身模态分析 ……126
6.2.3 简化的制动系统的复特征值分析 ……128
6.3 相关卡片 ……131
6.4 有限元分析中的单位制 ……135
6.5 模态加速技术……136
6.6 本章小结 ……137

第7章 频率响应分析 ……138

7.1 频率响应分析基本理论 ……139
7.2 RADIOSS 频率响应分析

流程……142
7.3 分析实例……144
7.3.1 平板的直接频率响应分析……144
7.3.2 平板的模态频率响应分析……151
7.3.3 轮毂的频率响应分析……153
7.3.4 加速度激励的频率响应分析……160
7.4 相关卡片……164
7.5 本章小结……168

第 8 章 瞬态响应分析……169

8.1 瞬态响应分析基本理论……170
8.2 瞬态响应分析实例……172
8.2.1 支架的直接瞬态动力学分析……172
8.2.2 支架的模态法瞬态动力学分析……177
8.3 相关卡片……182
8.4 本章小结……183

第 9 章 响应谱分析和随机振动分析……184

9.1 响应谱分析基本理论……185
9.2 随机响应分析（随机振动）基本理论……187
9.3 分析实例……189
9.3.1 响应谱分析实例……189
9.3.2 随机响应分析实例（一）……194
9.3.3 随机响应分析实例（二）……197
9.4 本章小结……201

第 10 章 热-热力耦合分析……202

10.1 热-热力耦合分析基本理论……203
10.1.1 稳态热传导分析……203
10.1.2 热力耦合分析和优化……204
10.2 分析实例……204
10.2.1 热应力分析实例……204
10.2.2 稳态热传导分析实例……208
10.2.3 热–结构耦合分析实例……214
10.3 本章小结……220

第 11 章 疲劳分析……221

11.1 应力–寿命疲劳分析基本理论……222
11.1.1 S–N 曲线……222
11.1.2 等效名义应力……222
11.1.3 平均应力效应……223
11.1.4 其他影响疲劳的因素……223
11.1.5 创建疲劳分析……224
11.1.6 压缩载荷时间历程……225
11.1.7 疲劳载荷事件和序列……226
11.2 疲劳（应力–寿命）方法分析实例……226
11.3 本章小结……236

第 12 章 NVH 分析……237

12.1 汽车声腔网格划分……238
12.2 声固耦合 NVH 分析……247
12.3 本章小结……252

第 13 章 RADIOSS Block 概述……253

13.1 RADIOSS Block 历史沿革……254
13.2 RADIOSS 功能……254
13.3 RADIOSS Block 文件格式系统……255
13.4 RADIOSS 输入文件……258
13.5 前处理器 HyperCrash 介绍……259
13.6 本章小结……260

第 14 章 显式非线性基本理论……261

14.1 非线性动力学基本理论……262
14.1.1 有限元控制方程的显式积分算法……262
14.1.2 非线性动力学有限元求解流程……264
14.2 中心差分算法的稳定条件……265
14.3 RADIOSS Block 时间步长控制……266
14.3.1 RADIOSS Block 时间步长控制介绍……266
14.3.2 RADIOSS Block 时间步长控制卡片……267
14.4 RADIOSS Block 时间步长控制实例……268
14.4.1 实例教程——板材拉伸试验模拟……268
14.4.2 不同时间步长控制的对比……274
14.5 本章小结……275

第 15 章 常用单元类型……276

15.1 1D 单元……277
15.1.1 杆单元（Truss）……277
15.1.2 梁单元（Beam）……278
15.1.3 弹簧单元（Spring）……281
15.2 2D 单元……294
15.3 3D 单元……297
15.3.1 体单元（Solid）……297
15.3.2 厚板壳单元（Solid–Shell）……300
15.4 RADIOSS Block 单元公式应用实例……301
15.4.1 实例教程—圆管碰撞模拟……301
15.4.2 实例教程—齿轮对啮合冲击仿真……305
15.4.3 实例教程—手机跌落模拟……316
15.5 本章小结……324

第 16 章 材料与失效模型……325

16.1 RADIOSS Block 材料模型及其选用……326
16.2 常用材料模型……329
16.2.1 LAW2……329
16.2.2 LAW27……332
16.2.3 LAW36……332
16.2.4 LAW65……335
16.2.5 LAW68……336
16.2.6 LAW70……337
16.2.7 LAW82……339
16.3 RADIOSS Block 失效模型概述……340
16.4 常用失效模型……341
16.4.1 /FAIL/FLD……341
16.4.2 /FAIL/TENSSTRAIN……342
16.4.3 /FAIL/JOHNSON……343
16.4.4 /FAIL/TBUTCHER……344
16.4.5 /FAIL/WIERZBICKI……345
16.4.6 /FAIL/CHANG……346
16.5 工程结构常用材料的建模……348
16.5.1 金属及其合金……348
16.5.2 玻璃……352
16.5.3 泡沫、橡胶、弹性体……352
16.5.4 复合材料……353
16.6 RADIOSS Block 材料与失效模型应用实例……354
16.6.1 实例教程——橡胶衬套组合负载变形分析……354
16.6.2 实例教程——泡沫块钢球冲击模拟……361
16.6.3 实例教程——复合材料梁三点弯曲分析……372
16.7 本章小结……397

第 17 章 运动约束……398

17.1 刚体（/RBODY）……399
17.2 刚性墙（/RWALL）……400
17.3 实例教程—带包装材料电视机跌落试验模拟……402
17.4 本章小结……410

第 18 章 接触……411

18.1 基本概念……412
18.2 绑定接触（Interface Type 2）……414
18.3 对称和非对称接触（Interface Type 3 和 5）……415
18.3.1 对称接触（Interface Type 3）……415
18.3.2 非对称接触（Interface Type 5）……416
18.3.3 使用 Interface Type 3 和 5 的注意事项……417
18.4 刚体接触（Interface Type 6）……419

18.5 通用接触（Interface Type 7）……419
18.5.1 Gap……420
18.5.2 初始穿透……421
18.5.3 接触刚度……423
18.5.4 摩擦……424
18.5.5 时间步长控制……426
18.5.6 质量增加……427
18.5.7 软碰硬……428
18.5.8 边—边接触锁死……428
18.5.9 切向力……429
18.5.10 自动接触的 Gap 警告信息……430
18.5.11 单元删除……430
18.6 边—边接触（Interface Type 11）……431
18.7 本章小结……431

第 19 章 气囊模型……432

19.1 监测体积（Monitored Volume）……433
19.2 经典均压气囊模型（AIRBAG Type）……434
19.2.1 数值阻尼……435
19.2.2 初始条件……435
19.2.3 气体定义……435
19.2.4 泄气孔定义……436
19.2.5 泄漏……437
19.2.6 其他定义形式……437
19.3 均压多腔室流动气囊模型（Type COMMU）……438
19.4 有限体积法气囊模型（FVM Type FVMBAG）……440
19.4.1 基本定义……440
19.4.2 有限体积元的产生与管理……441
19.5 参考度量与气囊折叠……442
19.6 实例教程——使用 HyperCrash 进行气囊折叠……443
19.7 实例教程——气囊展开仿真……452
19.8 本章小结……461

第 20 章 SPH 和 ALE 求解流固耦合问题……463

20.1 SPH 基础……464
20.2 ALE 基础……466
公式的选择……467
20.3 SPH 和 ALE 应用实例……470
20.3.1 实例教程——应用 SPH 方法进行机翼鸟撞分析……470
20.3.2 实例教程——应用 ALE 方法进行船舶入水仿真……479
20.3.3 实例教程——水下爆炸仿真……487
20.4 本章小结……495

第 21 章 RADIOSS Block 隐式分析……496

21.1 RADIOSS Block 隐式功能介绍……497
21.1.1 单元公式……497
21.1.2 材料兼容性……498
21.1.3 运动学条件……498
21.1.4 接触……498

21.1.5 载荷 ······································· 498
21.2 激活隐式分析 ··························· 498
21.2.1 线性分析 ································· 499
21.2.2 非线性分析 ····························· 499
21.3 隐式求解器 ······························ 500
21.4 准静态分析 ······························ 500
21.5 非线性分析 ······························ 501
21.6 RADIOSS Block 隐式分析 Engine 文件示例 ······················ 502
21.7 实例教程——搭接接头隐式非线性分析实例 ······························· 504
21.8 本章小结 ·································· 517

第 1 章

RADIOSS 有限元求解器介绍



本章前半部分主要介绍有限元求解器 RADIOSS 的功能和架构，后半部分主要介绍 RADIOSS Bulk Data 输入文件的格式、常用关键字卡片、作业提交方法和运行选项等。从 12.0 版本开始，RADIOSS Bulk Duta 将改回原来名称 OptoStruct。

本章重点知识

1.1 Hyper Works 软件的优点

1.2 RADIOSS 简介

1.3 RADIOSS Bulk Data 输入文件概述

1.4 RADIOSS Bulk Data 分析流程及运行选项

1.5 本章小结

1.1　HyperWorks 软件的优点

Altair 公司的 HyperWorks 系列软件是企业级 CAE 解决方案。Altair 公司始终遵循开放的理念，在其平台基础上坚持为客户提供最为广泛的 CAD 和 CAE 软件接口。HyperWorks 具有如下优点。

1．良好的交互性

（1）广泛的 CAD/CAE/CFD 软件接口。

（2）高质量的“几何–网格”相互转换技术。

（3）直接集成 Microsoft Office 应用程序。

2．高性价比的求解器技术

（1）RADIOSS 求解器技术全面，涵盖各类分析范畴。

（2）多体动力学仿真技术轻松应对刚柔耦合问题。

3．功能强大的建模和可视化技术

（1）自动化的几何清理和网格划分功能，确保较高的建模效率。

（2）强大的交互功能帮助用户提升模型质量，确保仿真精度。

（3）强大的图形驱动，轻松驾驭超大模型。

（4）丰富的后处理功能和生动直观的后处理效果。

4．行业领先的优化创新技术

（1）被广泛应用于工程实际的结构和多学科优化技术。

（2）丰富的设计案例库可供参考，提升行业创新能力。

5．强大而可靠的流程和数据管理技术

（1）成熟的架构，易于快速部署和实施。

（2）开放的架构，易于与其他系统或应用程序集成。

（3）利用 PBS 技术实现数据和计算资源的整体管理。

1.2　RADIOSS 简介

RADIOSS 是 HyperWorks 系列软件中的结构求解器。RADIOSS 求解器在显式非线性分析领域拥有悠久的历史。在融合最新开发的线性和隐式非线性求解功能后，它又创造了新的价值。使用该求解器可帮助提升产品的刚度、强度、耐用性、NVH 特性、碰撞安全性能和可制造性等，可以降低物理实验的成本，提升整体研发的效率和质量。RADIOSS 融合了线性与非线性结构有限元求解技术、多体动力学仿真技术和流固耦合仿真技术。RADIOSS 求解器的突出优势如下。

1．可靠

在多 CPU 和不同操作系统环境下确保仿真结果的一致性。

2．快速

支持多域求解和高级质量缩放技术，支持 Hybrid－MPP 并行求解，突破传统求解器速度局限。

3．精确

通过 NAFEMS 标准测试，是被 GM、Ford、PSA、Volvo、PATAC、EADS 等领先制造企业所认可的新一代有限元求解器。

4．全面

RADIOSS 的功能涵盖有限元分析的所有领域，并能实现与多体动力学（MBD）仿真和流体仿真（CFD）耦合。图 1–1 是离心风扇噪声的流固耦合分析的例子。图 1–2 是直升机坠落分析的例子。

5．易用

RADIOSS 与 HyperWorks 中前处理及优化模块紧密集成，易于操作且易于实现优化。

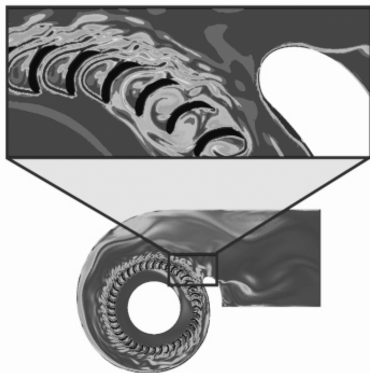


图 1–1　强大的流固耦合分析功能



图 1–2　直升机坠落仿真分析

6．包含丰富的材料模型和失效准则

材料模型可以模拟假人、气囊、钢结构和混凝土结构等特殊结构。

RADIOSS 求解器的架构如图 1–3 所示，不同的求解器模块可以通过脚本无缝集成。

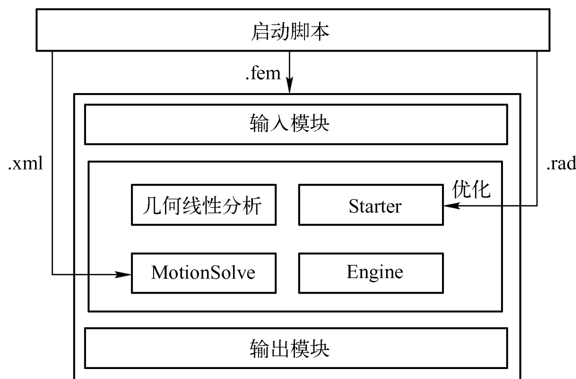


图 1–3　求解器架构图

1.3 RADIOSS Bulk Data 输入文件概述

1.3.1 RADIOSS Bulk Data 输入文件简介

输入文件是求解器所需的信息的集合，生成求解输入文件是前处理的目标。RADIOSS Bulk Data 模块需要的输入文件为 NASTRAN 风格，可用于有限元分析和结构优化。

Bulk Data 输入文件格式由 I/O（输入/输出控制段）、SUBCASE（工况控制段）、Bulk Data（模型数据段）3 个不同字段组成。I/O 段用于控制分析或优化的全局，包括输出的类型、格式、频率，运行的类型（模型检查、分析、超单元生成、优化或者优化的重启动），输入/输出及临时文件的名称和存放位置；SUBCASE 段控制工况信息（也叫载荷步）。它决定在一个 SUBCASE 中使用哪些载荷和边界条件，控制输出的类型和频率、优化的目标和约束；Bulk Data 段包含所有有限元数据，如节点、单元、属性、材料、载荷和边界条件、坐标系等。对于优化分析还包含设计变量、响应和约束。Bulk Data 段由 BEGIN BULK 开头，ENDDATA 结束。典型的 RADIOSS Bulk Data 输入文件如下。

```
TITLE = WING
DISPLACEMENT(H3D) = ALL
STRESS(H3D,ALL,CENTER) = YES
OUTPUT,H3D,ALL
SCREEN OUT
$$--------------------------------------------------------------------------$
$$                              Case Control Cards
$$--------------------------------------------------------------------------$
SUBCASE         1
   SPC =        1
   LOAD =          2
SUBCASE         2
   SPC =        1
   LOAD =          3
BEGIN BULK
GRID            1            1875.0    -111.0586250.0
GRID            2            1790.864-57.876 6250.0
GRID            3            1706.106-5.7125 6250.0
GRID            4            1616.54237.604986250.0
GRID            5            1525.67878.118    6250.0
…
CQUAD4         500          1      1046      1023      1024      104889.65471
CQUAD4         501          1      1048      1024       556       55589.77549
CQUAD4         502          1      1027      1026      1049      104489.83368
CQUAD4         503          1      1044      1049      1050      104389.78249
CQUAD4         504          1      1043      1050      1045      104290.31202
```

```
…
PSHELL    1    15.0    1    1    0.0
…
SPC    1    2401    1234560.0
SPC    1    2396    1234560.0
…
```

1．单文件设置

单文件设置是指所有字段全部放在一个文件中。Bulk Data 段必须放在文件的最后部分。推荐使用.fem 作为文件扩展名以方便识别。

2．多文件设置

多文件设置通过使用 INCLUDE 实现。该选项允许用户包含多个文件的信息而无需复制粘贴。INCLUDE 可以放在文件的任何字段，但必须包含该字段的完整信息。例如，不能将一个关键字卡片分拆到不同的 INCLUDE 文件中去。

下面的例子展示了如何在 SUBCASE 段使用 INCLUDE 添加额外的 SUBCASE。使用的.fem 输入文件如下。

```
SUBCASE 1
SPC = 1
Load = 2
INCLUDE sub2.inc
BEGIN BULK
以下是在 sub2.inc 文件中的内容：
SUBCASE 2
SPC = 1
Load = 3
```

求解器会读取所有文件并将 INCLUDE 文件中的行复制到输入文件（input.fem）中的 INCLUDE 申明所在位置。RADIOSS 读取到的 input.fem 文件信息如下。

```
SUBCASE 1
SPC = 1
Load = 2
SUBCASE 2
SPC = 1
Load = 3
BEGIN BULK
```

1.3.2 I/O 选项和 SUBCASE 段使用指南

所有输入卡片每行最多 80 个字符，超过 80 个字符的部分将被忽略。

如果卡片信息中需要包含文件名信息（OUTFILE、RESTART、INCLUDE、LOADLIB、

TMPDIR、EIGVNAME 和 ASSIGN），则该卡片每行最多可以有 200 个字符，或者文件名可以放在引号（英文输入法下的双引号或者硬撇号）内分布在多行。

文件名可以使用绝对路径或相对路径。反斜杠\或斜杠/都可作为路径的分隔符。Windows 风格的以驱动器字符开头的路径（如 D:/users/mbg/workarea）仅当定义了环境变量 DOS_DRIVE_#时可用。环境变量的内容会替换掉文件名中路径的开头两个字符（如“D:”）。扩展后的文件名必须在 200 个字符以内。环境变量 DOS_DRIVE_#也可以在配置文件中定义。

自由格式每行最多包括 10 个字段，自由格式的分隔符可以是以下任意一种：空格（“ ”），逗号（“,”），左括号（“（”），右括号（“）”），等号（=）。该规则对名称和标题（TITLE、SUBTITLE 和 LABEL）不适用。

P2G/K2GG/M2GG/B2GG 项每行允许超过 10 个字段（80 个字符以内）。

GROUNDCHECK/WEIGHTCHECK/FLSPOUT/EIGVRETRIEVE/XYPLOT 项每行允许超过 10 个字段，并且允许续行。

$到行末的部分为注释。$也可以作为文件名的一部分，但是必须放在引号内（引号可以是英文的双引号或者硬撇号）。

以//或者#开头的行是注释行，空行也是注释行。

续行通过前一行最后一个字段中的逗号（“,”）识别。

数值必须以数字或者“+”/“−”开头。

整数项不能包含小数点或指数部分，并且必须在$-2^{31}<x<2^{31}$范围内，要求输入实数的字段可以输入整数代替，系统会自动转换为双精度的实数。

除了标题和文件名外的任何字段超过 8 位的字符会被系统自动去掉，并且没有任何警告信息。除了用户定义的标签、标题和文件名外的所有字符串都不区分大小写。除了 Windows 系统外，文件名总是区分大小写。

在不至于混淆的情况下，较长的关键字可以使用前 4 个字符代替（缩写）。

例如，以下 3 行是等效的：

```
DISPLACEMENT (form) = option
disp FORM option
displa , form , oPTIOn
```

下面是一个有多个续行的卡片：

```
XYPLOT, XYPEAK, VELO, PSDF / 3(T2),
6(T2), 8(T2), 10(T2),
20(T2)
```

以下是一个被分割在多行的路径：

```
INCLUDE "path/
/split into multiple / lines
/filename.txt "
```

等价于：INCLUDE "path//split into multiple / lines/filename.txt "

注意到输入中的一些空格，特别是最后一个空格是文件名的一部分，最好避免在路径或

文件名中使用空格。

1.3.3 输入/输出文件类型介绍

Bulk Data 输入文件格式为 NASTRAN Bulk Data 格式。Bulk Data 输出文件格式有 Altair 公司的.h3d 和.res 等二进制文件，NASTRAN 的.op2 和.pch 文件等。

1.3.4 单元介绍

RADIOSS Bulk Data 有丰富的单元类型，按照不同的单元形态可以分为零维、一维、二维和三维单元。

1．零维单元

CELAS1、CELAS2、CELAS3 和 CELAS4 用于定义弹簧单元。CELAS1 和 CELAS3 的属性是 PELAS。CELAS2 和 CELAS4 自带属性。

CDAMP1、CDAMP2、CDAMP3 和 CDAMP4 用于定义标量阻尼单元。CDAMP1 和 CDAMP3 的属性是 PDAMP。CDAMP2 和 CDAMP4 自带属性

CMASS1、CMASS2、CMASS3 和 CMASS4 用于定义质量点。CMASS1 和 CMASS3 的属性是 PMASS、CMASS2 和 CMASS4 自带属性

CONM1 和 CONM2 是集中质量单元。CONM1 在节点位置定义一个 6×6 质量矩阵。CONM2 在节点位置定义质量和惯性属性。

CVISC 用于定义粘性阻尼，CVISC 的属性是 PVISC。

2．一维单元

CBEAM——通用梁单元。

CBAR——简单梁单元。

CBUSH——通用弹簧阻尼单元。

CBUSH1D——杆类型的弹簧阻尼单元。

CGAP——间隙单元，支持轴向和摩擦载荷。

CGAPG——间隙单元，支持轴向和摩擦载荷，可用于连接曲面片（不需要点对点连接）。

CROD——杆单元，支持轴向力和扭矩。

CWELD——简单轴向梁单元，支持力和力矩，不需要点对点连接，可用于连接曲面片。

这些单元的属性分别由 PBEAM、PBAR、PBUSH、PBUSH1D、PGAP、PROD 和 PWELD 定义。

通常来说，简单的单元总是可以由一些更高级的单元来替代，但是需要填写更多的选项。例如，CELAS 单元可以用 CBUSH 单元代替，CROD 单元可以用 CBAR 代替，CBAR 可以用 CBEAM 代替等。

3．二维单元

二维单元用于模拟薄板，包括面内变形（膜行为）、平面应变和弯曲（包括横向剪切与

膜，弯曲的耦合）。对于纯二维应用可以使用平面应变选项，属性使用 PSHELL。通过修改 PHELL 的选项二维单元也可以用于模拟厚板。薄板和厚板的区分在于厚度方向与其他两个方向尺寸的比例（这里指的是被模拟的实际结构而不是单元）。

4．三维单元

三维实体单元用于模拟厚板和实体结构。通常所有无法用一维单元和二维单元简化的模型都需要使用三维实体单元进行模拟。三维实体单元包括 CHEXA、CPENTA、CPYRA 和 CTETRA，属性是 PSOLID。

无论是二维单元还是三维单元，划分网格的时候都有注意网格的疏密程度。网格的疏密程度没有一成不变的标准，需要根据计算机的计算能力、结构的载荷特点、所选择的单元类型和所进行的分析类型等来综合确定。通常应力分析比静刚度的分析需要更细的网格，求解高阶模态需要比低阶模态更细的网格，屈曲分析中的薄弱部分需要更细的网格。目前一些大公司已经在网格划分方面建立了一整套较详细的标准。

1.3.5 材料介绍

RADIOSS 有多种材料模型，包括各向同性材料、各向异性材料、正交各向异性材料和各种非线性材料。

MAT1 用于定义各向同性材料。

MAT2 用于定义各向异性材料，只能用于膜单元和弯曲单元，只能被 PSHELL、PCOMP 和 PCOMPG 引用。该材料用于指定平面内应力与平面内应变的关系。材料坐标系与单元坐标系的角度在单元坐标系中指定。

MAT4 用于定义各向同性弹性材料。

MAT5 用于定义各向异性弹性材料。

MAT8 用于定义二维正交各向异性材料，常用于定义复合材料铺层的材料，只用于壳单元，只能被 PSHELL、PCOMP 和 PCOMPG 引用。

MAT9 用于定义三维各向异性弹性材料。

MAT10 用于定义流固耦合（声场）中的流体，只能被带 FCTN=PFLUID 选项的 PSOLID 属性引用。

温度相关的材料用 MATT2、MATT8 和 MATT9 定义，性质和以上材料类似。温度相关属性使用 TABLEM1、TABLEM2、TABLEM3 或 TABLEM4 定义。

复合材料使用 PCOMP 和 PCOMPG 属性定义。它们不属于材料类型，复合材料不同的层可以具有不同材料。

非线性材料使用 MATS1 定义，可以参考 TABLES1 定义非线性材料特性。MATS1 是 MAT1 的扩展项，两者使用相同的 ID 号，可用于所有非线性求解序列。

对几何非线性分析，可用的非线性材料种类更多。作为规则，只用于几何非线性分析的材料都是 MAT1 的扩展项并与其共用一个 ID 号，材料曲线可引用 TABLES1。

非线性分析材料定义示例：

```
MAT1, 102, 60.4, , 0.33, 2.70e-6
```

MATX02, 102, 0.09026, 0.22313, 0.3746, 100.0, 0.175

几何非线性分析中使用的材料如下。

Johnson-Cooke 弹塑性材料 MATX02、刚性材料 MATX13、脆性弹塑性材料 MATX27、粘弹性泡沫材料 MATX33、分段线性弹塑性材料 MATX36、Ogden-Mooney 和 Rivlin 材料 MATX42、Cowper-Symonds 弹塑性材料 MATX44、超粘弹性材料 MATX62、表格形式的依赖于应变率的弹塑性材料 MATX65、表格形式的粘弹性泡沫材料 MATX70、Ogden 材料 MATX82。

1.3.6 有限元分析的结果

有限元分析得到的初始结果是节点的位移和转动。单元的应力、应变和应变能都是从节点的位移和转动计算得到的。其他结果如单元力、MPC 力、SPC 力和节点力是后处理过程通过后处理工具得到的。

结果输出定义在 I/O 段设置，具体参考 OUTPUT、STRESS、DISPLACEMENT、ESE、SPCFORCE 和 GPFORCE 等卡片。

线性静态分析和频率响应分析会计算平动和转动。频率响应分析中还会计算速度和加速度。模态分析和线性屈曲分析的初始结果是特征向量。在模态分析中它们根据质量矩阵或者分析中最大位移矢量分量进行归一化。屈曲分析总是使用最大位移矢量分量进行归一化。

位移、速度、加速度和特征向量是节点结果。它们显示为变形后的结构，比如在未变形结构上显示等值图等，还可以通过 HyperView 进行结果的动画显示。

应力是静态分析中的二次结果。在切口及其他形状的拐角处，点载荷和边界条件施加位置，刚性单元位置的应力通常是奇异的，所以这些应力通常没有参考意义。这属于有限元理论本身的内在缺陷，与具体使用的软件无关。在这些局部细化网格有助于提高应力的计算精度。理论上应力无限大的点的应力无法使用有限元法预测。应力在高斯积分点计算，这些点的应力是最准确的，但软件也可以提供单元应力、角点应力和节点应力。单元应力在单元的中心计算，可以在后处理软件选择显示未平均的单元应力。

由于关心的应力通常都出现在结果的表面，所以细化网格不仅可以提高应力预测精度，同时也改变了应力计算的位置。通常可以在三维模型的外表面覆盖一层二维膜单元或者在二维单元边界附加杆单元来计算体表面或者曲面边界的应力。这种方法不影响应力本身但是把输出位置设置到了想要的位置（表面或边界），由于只需要查看边界的应力，所以可以在后处理中只显示这部分的应力从而可以大幅度提高后处理的速度。

通过后处理软件查看结果的应力张量中的主应力方向有助于确定载荷路径。

通过插值高斯点的应力到单元节点可以得到单元角点应力。单元角点应力可以在后处理软件通过等值图查看。模态分析不能输出实体单元的角点应力。

节点应力通过平均节点连接的单元应力得到。平均不考虑应力自由边界。另外，在不同材料的交界面应力会发生突变。应变和应变能的情况和应力基本一致，不再重复介绍。

单元力、MPC 力，SPC 力和节点力可以以列表的形式输出到结果文件中（如输出到. pch 文件中）。

1.4 RADIOSS Bulk Data 分析流程及运行选项

1.4.1 RADIOSS Bulk Data 分析流程

RADIOSS Bulk Data 的分析流程如图 1-4 所示。

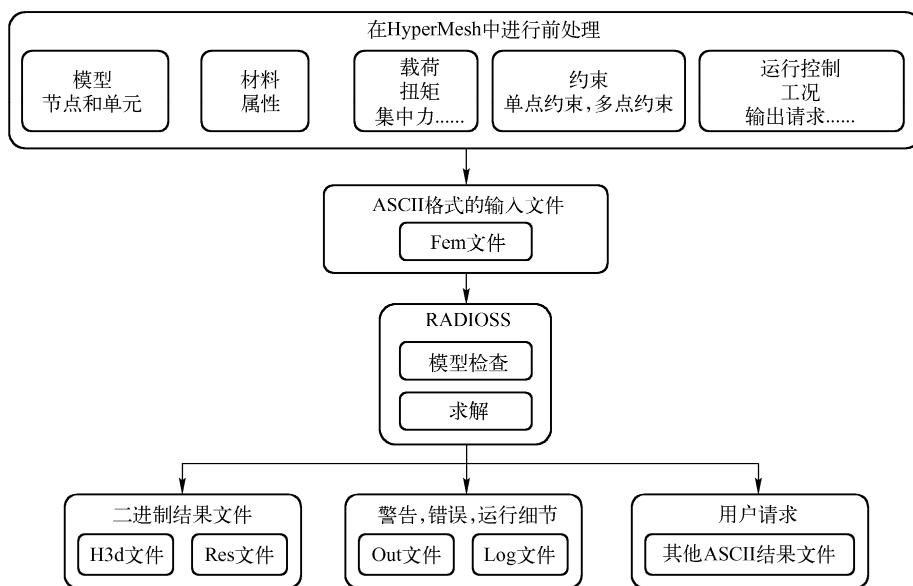


图 1-4　RADIOSS Bulk Data 的分析流程

1.4.2 RADIOSS 运行选项（Block 和 Bulk Data）

选择菜单“开始”→“程序”→Altair HyperWorks 11.0→RADIOSS 命令，弹出如图 1-5 所示的界面。RADIOSS 的运行选项在图 1-5 所示的界面下输入。

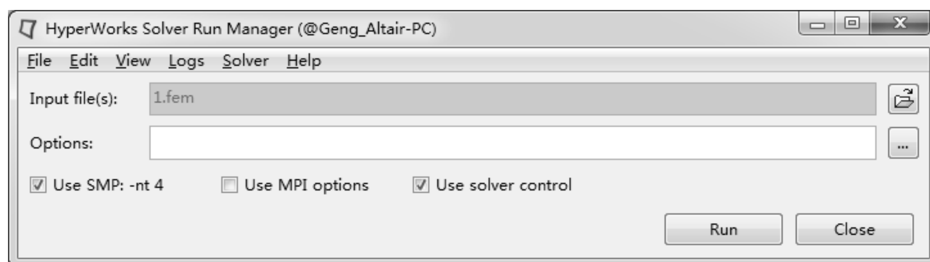


图 1-5　RADIOSS 作业提交及运行选项输入界面

在 View 菜单下选择 Select Options，弹出如图 1-6 所示的界面用于输入控制选项。

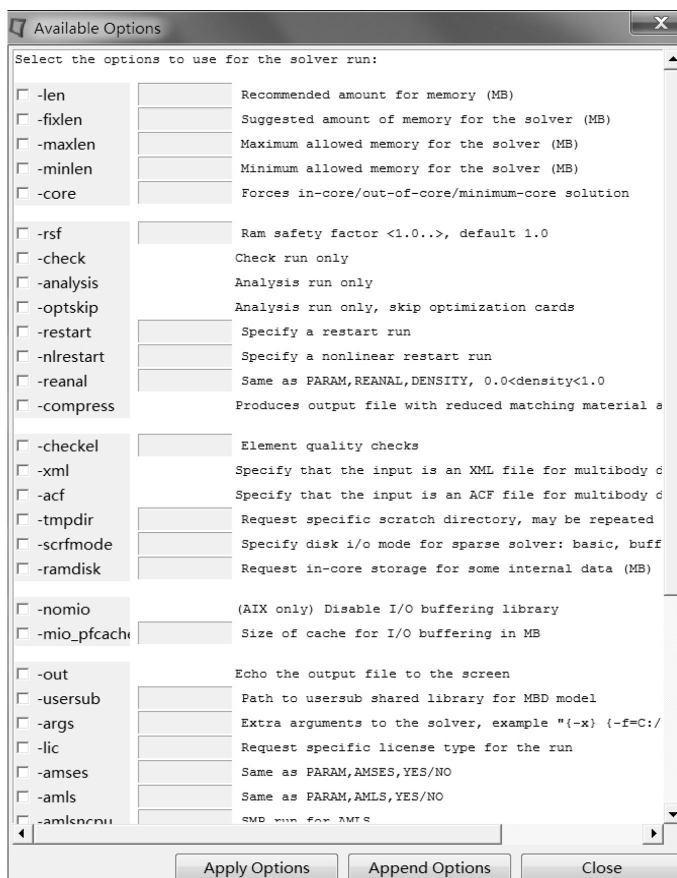


图 1-6 RADIOSS 运行选项输入界面

或者在 HyperMesh 界面中选择 Analysis→RADIOSS 命令，弹出如图 1-7 所示的界面，在该界面中进行 RADIOSS 作业提交及运行选项输入。



图 1-7 在 HyperMesh 中进行 RADIOSS 作业提交及运行选项输入的界面

可以使用的运行选项及参数如表 1-1 所示。

表 1-1 运行选项及参数

选　项	参　数	描　述	适用范围
-len	内存大小，单位为 MB	动态内存分配的上限 求解器会基于内存需求自动选择 in-core、out-of-core 或最小 core 求解。不论指定内存为多少，RADIOSS 至少会尝试使用最小 core 求解。此选项将被-core 选项覆盖 默认值=320MB （示例：RADIOSS infile.fem –len 32）	所有平台

（续）

选　　项	参　　数	描　　述	适 用 范 围
-maxlen	内存大小，单位为MB	动态内存分配的强制上限 RADIOSS 不会超过这个限制 无默认值 （示例：RADIOSS infile.fem –maxlen 1000）	所有平台
-core	in、out 和 min	in ：强制使用 in-core 求解 out：强制使用 out-of-core 求解 min：强制使用最小 core 求解 求解器适当分配所需的内存。如果没有足够的可用内存，RADIOSS 将会报错。此选项将会覆盖-len 选项 （示例：RADIOSS infile.fem –core in）	所有平台
-fixlen	内存大小，单位为MB	不使用动态内存分配 RADIOSS 将分配指定数量的内存并在求解过程中一直使用它们。如果内存不可用或求解进程中内存不足，则 RADIOSS 将报错并终止。为了防止不当地指定内存，建议首先使用-check 选项运行 RADIOSS，然后使用它预测的结果去适当地定义-fixlen 的内存参数大小 在某些平台上，此选项可以避免产生内存碎片，并且与动态内存分配相比，它可能申请到更多的内存 此选项将被-len 和-core 选项覆盖 （示例：RADIOSS infile.fem - fixlen 500）	所有平台
-rsf	安全系数	为内存申请的上限设定一个安全系数 已定义-maxlen 时，此选项不可用 （示例：RADIOSS infile.fem –rsf 1.2） （示例：RADIOSS infile.fem –len 32 –rsf 1.2） （示例：RADIOSS infile.fem –core out –rsf 1.2）	所有平台
-check	无参数	通过命令行提交一个检查作业 所需内存自动分配 不能与–analysis、-optskip 或 –restart 同时使用 （示例：RADIOSS infile.fem –check）	所有平台
-checkel	yes、no 和 full	如果为“no”，将不进行单元质量检查，但是将进行数学有效性的检查。 如果为“yes”，或没有参数，将会检查每个单元的质量。任何一项超出错误限定阈值将会引发一个致命错误并导致运行终止。任何一项超出警告阈值则不是致命的。单元质量的错误或警告信息以及超过限定的单元质量指标将被输出。每类信息仅输出前 3 个，还会输出所有错误信息的汇总表 如果为“full”，将会进行单元质量检查，但所有单元质量不满足要求的错误或警告信息都会输出 默认值：yes （示例：RADIOSS infile.fem –checkel full） （示例：RADIOSS infile.fem –checkel）	所有平台
-analysis	无参数	提交一个分析作业。此参数也会检查优化参数设置。如果有任何错误，任务将会终止 -optskip 参数将会忽略优化设置仅运行分析作业 不能与-check 或-restart 同时使用 （示例：RADIOSS infile.fem –analysis）	所有平台
-optskip	无参数	提交一个分析作业而不检查优化参数设置（忽略所有与优化有关的卡片） 不能-check 或-restart 同时使用 （示例：RADIOSS infile.fem -optskip）	所有平台
-restart	filename.sh	该参数用于 OptiStruct 优化分析的重启动。定义一个重启动作业。如果不提供参数，RADIOSS 将会在相同目录下寻找扩展名为.sh 的重启动文件作为输入文件。如果在 PC 上输入一个参数，必须包含重启动文件的完整路径及文件名 不能与-check、-analysis 或 –optskip 同时作用 （示例：OptiStructinfile.fem -restart）RADIOSS 搜索重启动文件 infile.sh. （示例：OptiStructinfile.fem –restart C:\oldrun\old_infile.sh） OptiStruct 搜索重启动文件 old_infile.sh.	所有平台

（续）

选　　项	参　　数	描　　述	适 用 范 围
-reanal	密度阈值	此选项只能与 –restart 联合作用 在一个重启动作业中包含此选项将对最后一步迭代进行重新分析 如果指定的“密度阈值”小于优化参数 MINDENS（默认值=0.01），则所有单元将被赋予优化过程最后一个迭代步的密度值 如果指定的“密度阈值”大于优化参数 MINDENS，则密度小于阈值的单元，它们的密度将被设定为 MINDENS 的值，其他单元的密度将被设定为 1.0 （示例：OptiStructinfile.fem -restart -reanal 0.3）	所有平台
-xml	无参数	为多体动力学求解序列指定输入文件为一个 XML 文件	所有平台
-acf	无参数	为多体动力学求解序列指定输入文件为一个 ACF 文件	所有平台
-out	无参数	将.out 输出文件内容打印至屏幕。此选项优先级高于 I/O 选项 SCREEN （示例：RADIOSS infile.fem -out）	所有平台
-outfile	输出文件名的前辍	定向输出文件到一个不同于输入文件所在的文件夹。如果此文件夹不存在，则输出到其默认的工作目录，指定的参数作为输出文件的前辍。此选项优先级高于 I/O 选项 OUTFILE （示例: RADIOSS infile.fem -outfile results）；此时 RADIOSS 将输出 results.out 等	所有平台
-scror-tmpdir	path、filesize=n 和 slow=1	指定临时文件写入的文件夹。参数 filesize=n 和 slow=1 为可选项。多个参数可以用逗号分隔 path；指定交换文件存储路径 filesize=n ；定义可以写入该路径的交换文件的最大尺寸（单位为 GB） slow=1 ;指定一个网络驱动器 （示例：RADIOSS infile.fem –scrfilesize=2,slow=1,/network_dir/tmp） 重复参数-tmpdir 或-scr 可以定义多个交换文件路径。 （示例：RADIOSS infile.fem –tmpdir C:\tmp –tmpdirfilesize=2, slow=1, Z:\network_drive\tmp） 此选项将覆盖环境变量 OS_TMP_DIR 和定义在输入文件 I/O 部分的 TMPDIR 选项 更多详细描述，请参考 I/O 选项 TMPDIR	所有平台
-scrfmode	basic 、 buffered 、unbuffer 、smbuffer 和 stripe	为线性求解器选择不同的临时文件存储模式（特别是 out-of-core 和 minimum-core 求解）。多个参数用逗号分隔 （示例：RADIOSS infile.fem –scrfmode buffered, stripe – tmpdir C:\tmp） 更多详细描述，请参考 I/O 选项 SYSSETTING	所有平台
-ramdisk	虚拟磁盘大小，单位为 MB	指定在虚拟硬盘的大小 （示例：RADIOSS infile.fem –ramdisk 800） 更多详细描述，请参考 I/O 选项 SYSSETTING 中的 RAMDISK 设置	所有平台
-amls	无参数	调用外部的模态特征值求解器。环境变量 AMLS_EXE 需指向 AMLS 的可执行文件 此选项会覆盖输入文件中 PARAM 和 AMLS 的设置 （示例：RADIOSS infile.fem –amls）	所有平台
-amlsncpu	1、2 或 4	定义外部 AMLS 特征值求解器使用的 CPU 个数。此参数将会定义环境变量 OMP_NUM_THREADS 默认值为当前 OMP_NUM_THREADS 的值。注意这个值可以通过命令行参数-nproc 或-ncpu 指定 RADIOSS 和 AMLS 可以在运行中调用不同数量的处理器。例如，在同一个作业中 RADIOSS 使用 1 个处理器，而 AMLS 使用 4 个处理器 只能与-amls 同时使用或当 PARAM、AMLS 设定为 YES 时有效 此选项将会覆盖输入文件中 PARAM 和 AMLSNCPU 的设置 默认值：RADIOSS 使用的处理器个数 （示例：RADIOSS infile.fem –amls –amlsncpu 4）	所有平台

（续）

选　项	参　数	描　述	适用范围
-cpu 或-proc 或-nproc 或-ncpu	核心数	SMP 求解所使用的核心数 （示例：RADIOSS infile.fem -ncpu 2）	所有平台
-lic	FEA、ADVFEA、HFS、RADIOSSA、RADIOSSB 和 OPT	FEA - 仅有限元分析（RADIOSS FEA） ADVFEA - 高级分析（RADIOSS Adv） HFS - 金属成型一步法求解（HyperFormSolver） RADIOSSA - 基本的有限元分析（RadiossA） RADIOSSB - 高级有限元分析（RADIOSSB） OPT - 优化（OptiStruct or OptiStructMulti） 在读入输入数据之前，求解器检查是否具有指定类型的 license。一旦输入数据读入，说明求解器已证实请求的 license 类型正确。如果不正确，则 RADIOSS 将会出错并终止 无默认值。 （示例：RADIOSS infile.fem -lic FEA）	所有平台
-mio	无参数	打开模块化 I/O 注意，主机上应打开异步 I/O （示例：RADIOSS infile.fem -mio）	AIX
-mio_pfcache	MIO PF 缓存大小，单位为 MB	指定 MIO 所使用的 PF 缓存大小。这一部分内存是在 RADIOSS 使用的内存以外申请的 默认值为 2GB （示例：RADIOSS infile.fem –mio –mio_pfcache 1000）	AIX
-mpi	无参数	在支持的平台上启动一个基于 MPI 的 MPP 作业 注意，需要 HP-MPI （示例：RADIOSS infile.fem –mpi –np 4）	Linux
-np	处理器数	在 MPP 分析中使用的处理器数 （示例：RADIOSS infile.fem –mpi –np 4）	Linux
-mpipath	路径	指定包含 HP-MPI 可执行程序的文件夹路径 注意，如要在同一系统中安装了不同供应商的 MPI，此选项是有用的。只对 MPI 作业有效 （示例：RADIOSS infile.fem –mpi –np 4 –mpipath/apps/hpmpi/bin）	Linux
-testmpi	无参数	检查 HP-MPI 是否配置正确以及 RADIOSS 的 MPP 版本在系统中是否可用 （示例：RADIOSS infile.fem –mpi –np 4 –mpipath /apps/hpmpi/bin -testmpi）	Linux
-version	无参数	检查 RADIOSS 版本及发布时间	所有平台
-manual	无参数	启动 RADIOSS 在线用户手册	UNIX 和 Linux
-h	无参数	显示脚本用法	所有平台
-compress	无参数	提交一个 compression 作业 减少重复的材料和属性定义。生成的 bulk data 文件为<filename>.echo。不能与其他任何选项同时使用。更多信息请参考 RADIOSS Compression Run （示例：RADIOSS infile.fem –compress）	所有平台

1.5　本章小结

RADIOSS 是 Altair 公司主要的求解器。此外 Altair 公司的前处理 HyperMesh、后处理 HyperView 以及结构优化软件 OptiStruct 也是具有相当知名度的软件。.fem 文件是 RADIOSS Bulk Data 的默认输入文件。该输入文件为 ASCII 格式文件，可以由 HyperMesh 等许多前处

理器生成，也可以由文本编辑器等软件生成。.fem 文件是前处理和求解器进行信息传递的中介。通常来说，前处理器和求解器是由不同的团队开发的，有时前处理器的开发进度会滞后于求解器，这时就会出现某些求解器的最新功能所需要的卡片无法在前处理器中生成。这时用户需要手工编辑.fem 文件。另外一种情况是，HyperMesh 可以生成该卡片，但是一次只能生成一个，而求解需要的是成千上万个类似的卡片，例如需要创建 5000 个工况，这时可以使用 HyperMesh 的二次开发功能快速自动化地实现。

第 2 章



线性静力分析

线性静力分析是工程中最基本也最常用的分析序列之一。静态强度是大部分结构必须要满足的基本要求。通过线性静力分析可以得到结构在静态载荷作用下的强度和刚度性能，同时静力分析的结果也是进行疲劳分析的基本输入数据。本章将介绍 RADIOSS 线性静力分析的基本理论、使用 HyperMesh 作为前处理的分析流程和常用卡片介绍等内容。对一些较难的知识比如接触建模、复杂梁单元建模、复杂压力载荷施加等做了专题介绍并对部分关键字卡片给出了详细说明。

本章重点知识

2.1　静力分析基本理论及软件分析流程
2.2　线性静力分析实例
2.3　相关卡片
2.4　相关知识
2.5　本章小结

2.1 静力分析基本理论及软件分析流程

2.1.1 静力分析基本理论

静态载荷作用下的结构需要求解的基本有限元方程可以表示为

$$Ku=P \tag{2-1}$$

式中，K 为结构的刚度矩阵（各个单元刚度矩阵的组合）。矢量 u 为位移向量，而 P 是作用在结构上的载荷向量，上面的方程实际上是外力和内力的平衡方程。

如果不施加足够的位移约束去除模型的所有刚体位移自由度，结构刚度矩阵是奇异的。这时得到的方程解没有实际意义。

平衡方程可以通过直接法求解器或迭代法求解器求解。默认情况下会调用直接法求解器，位移未知量使用高斯消去法求解，高斯消去法会利用刚度矩阵 K 的稀疏性和对称性提高计算效率。另外，也可调用迭代求解使用共轭梯度法求解。直接法求解器非常稳健、准确、高效，迭代求解器在实体结构的求解速度方面有一定的优势。

迭代求解器通过 SUBCASE 段的 SOLVTYP 选项选择（引用 Bulk Data 段的 SOLVTYP 卡片）。详细信息可以在帮助中搜索 SOLVTYP 找到。

得到节点位移后可以通过材料本构关系计算单元应力。对于变形处在线性段（应力是应变的线性函数）的线性静态分析可以使用胡克定律计算应力。胡克定律可以表示为：

$$\rho=C\varepsilon \tag{2-2}$$

式中，应变ε是位移的函数，C 是材料的弹性矩阵。

2.1.2 以 HyperMesh 为前处理的软件分析流程

静态载荷和边界条件在输入文件的 Bulk Data 段定义。它们需要在 SUBCASE 段被 SPC 和 LOAD 引用。每个 SUBCASE 定义一种载荷工况。热载荷通过 SUBCASE 引用 TEMPERATURE 定义。由于每个工况只能引用一个 LOAD，所以如果模型中有多种载荷（如重力和压力）进行组合，则需要额外再创建一个 LOAD 卡片进行组合。建议使用 Tool 下拉菜单下的 Load Step Browser 以简化操作。该工具能创建和管理复杂的工况，并能根据需要自动创建 LOAD 等卡片。

静力分析中常用的载荷有集中力、集中力矩、重力、离心力、压力和温度载荷等。在某些情况下载荷加载是一件工作量很大的工作，故特意在本章的最后对 HyperMesh 中的一些加载方式进行了总结。

无约束模型或者未完全约束的模型可通过惯性释放求解。通过 SUBCASE 段的 SUPORT1 引用边界条件约束去除刚体位移，最多可选择 6 个自由度。这些约束也可以通过 SUBCASE 段的 SUPORT 引用边界条件约束去除或者使用 PARAM，INREL，−2 自动去除刚体位移。关于惯性释放的用法请参考本书第 5 章。

HyperMesh 中进行线性静力分析的流程如图 2-1 所示。

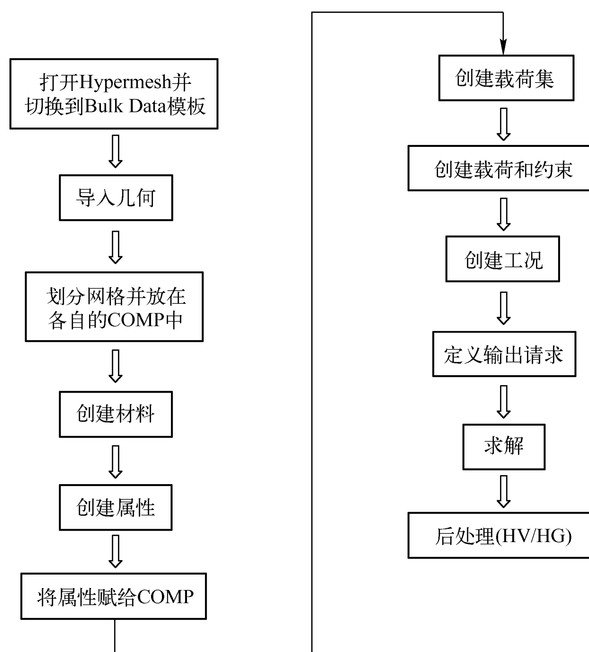


图 2-1　HyperMesh 中线性静力分析流程

2.2　线性静力分析实例

2.2.1　带孔方板的线性静态分析

本练习通过一个带孔薄板几何模型，说明如何创建有限元网格，设置边界条件，进行有限元分析，以及在 HyperView 中查看薄板的变形和应力。

STEP 01　启动 HyperMesh，将用户配置文件设置为 RADIOSSBulk Data

（1）启动 HyperMesh，此时弹出一个 User Profiles 的对话框。如果没有弹出，可从工具栏中的下拉菜单 Preferences 进入。

（2）在 User Profiles 对话框中选中 RADIOSS 单选按钮。

（3）在右端的下拉列表中选择 Bulk Data，单击 OK，如图 2-2 所示。

这样就导入了用户配置文件，包括适当的模板、宏菜单和数据读入接口，并根据生成 RADIOSS 和 OptiStruct 计算文件的需要对 HyperMesh 的功能进行调整。

说明：需要选择 User Profiles 的原因在于 HyperMesh 是一个中立于求解器的前处理系统，可以为各种求解器创建分析模型，Altair 公司对常用求解器进行了定制以简化用户操作。

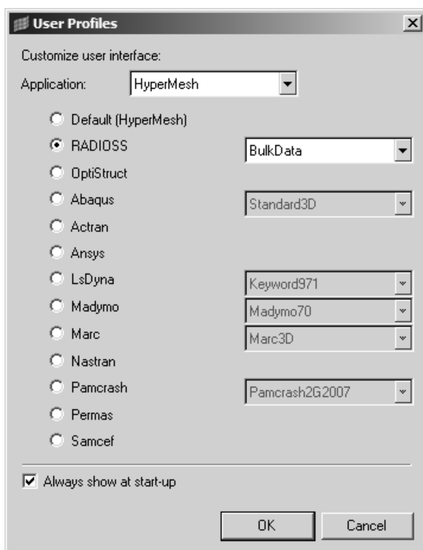


图 2-2　选择求解器模板

STEP 02 打开 plate_hole.hm 文件

（1）单击 File→open，弹出 Open Model 窗口。

（2）在该窗口中找到 plate_hole.hm 文件，单击“打开”按钮。如图 2-3 所示。

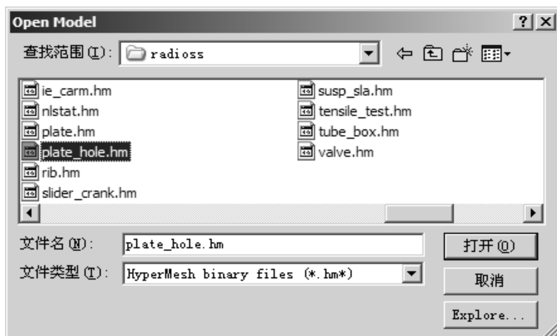


图 2-3　选择文件

plate_hole.hm 文件被导入到当前 HyperMesh 中，此模型只含有网格。

在 HyperMesh 中设置模型，建议建模时在创建组件集（Component Collectors）之前先创建材料集（Material Collectors）和属性集（Property Collectors）。这是创建模型最高效的方式，因为组件需要参考材料和属性。当然用户也可以根据自己的使用习惯和工作环境进行调整。

STEP 03 创建材料

（1）单击 Material Collector 工具栏按钮。

（2）选择面板左边的子面板 create。

（3）单击 mat name，输入 steel。

（4）选择材料的颜色。

（5）单击 type 选择 ISOTROPIC（各向同性材料）。

（6）单击 card image 选择 MAT1。

（7）单击 create/edit。

弹出 MAT1 卡片，如果材料卡片中某一项没有值，则表示该项没有激活。单击想改变的选项将其激活，下面会出现文本框，然后输入数据。在[E]下面输入 2.1e+0.5，[NU]下面输入 0.3，[RHO]下面输入 7.9e-09，如图 2-4 所示。

	ID	[E]	[G]	[NU]	[RHO]	[A]	[TREF]	[GE]
MAT1	1	2.1e+05		0.300	7.9e-09			
	[ST]	[SC]	[SS]					

图 2-4　输入材料参数

提示：如果单击后无法单击输入窗口可能是分辨率的问题，HyperMesh 需要使用较高的分辨率以达到理想的显示效果。可以尝试在原输入位置左侧一点的位置单击。如果无法在文本框中输入数据可能是输入法的设置问题，切换到英文输入法再试一式。

（8）单击 return 两次退出。

新材料 steel 被创建，该材料为线性各向同性材料 MAT1。材料的弹性模量为 2E+05，泊松比为 0.3。因为只进行静态分析，所以可以不设置材料的密度值，因为密度值只有在指定了重力载荷或者离心力载荷的情况下才会起作用。但是在模态分析等其他求解序列中需要设置密度值。

提示：如果希望考虑重力，仅仅定义密度还不够，还需要增加一个 GRAV 卡片和 LOAD 卡片。GRAV 卡片用于指定重力加速度的大小和方向，LOAD 卡片用于将重力和其他载荷组合起来。多工况的设置也可以在 Tool→Load Step Browser 中进行。该工具可以自动创建 LOAD 卡。

STEP 04 创建属性并更新组件（Component Collector）

（1）单击 Properties 工具栏按钮。

（2）单击 prop name 输入 plate_hole。

（3）单击 type = 选择 2D。

（4）单击 card image =选择 PSHELL。

（5）单击 material =选择 steel。

（6）单击 create/edit，此时弹出 PSHELL 卡片。

（7）单击[T]输入薄板的厚度 10.0，如图 2-5 所示。

	PID	MID1	[T]	MID2	[I12_T3]	MID3	[TS_T]	NSM
PSHELL	1	1	10.000	1		1		0.000

图 2-5　输入壳单元属性

（8）单击两次 return 回到主面板。

壳结构的属性被创建为 PSHELL，材料的信息也被赋予给了属性。

（9）单击 Component Collector 工具栏按钮。

（10）选择面板左边的子面板 update。

（11）单击 comps 在菜单中选择 plate_hole。

（12）将 no property 切换成 property。

（13）单击 propery=两次在菜单中选择 plate_hole 属性。第一次单击是激活，第二次单击是要更改它的值。属性卡片和材料信息自动显示在下面。

（14）单击 update，如图 2-6 所示。

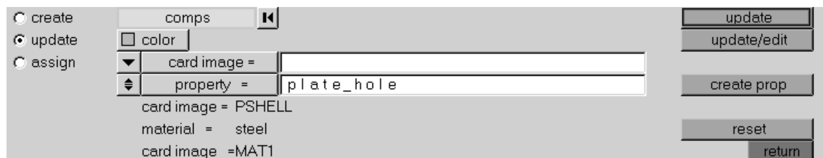


图 2-6　更新 components

（15）单击 return 返回主面板。

此时，组件 plate_hole 具有 plate_hole 的属性，并且被置为当前组件，此组件使用了 plate_hole 属性定义的 10mm 厚度，并且材料为 steel 。

卡片可以随时通过单击 Card Editor 按钮更改，组件的材料可以通过 Collectors 面板中的 update 子面板更改。

给模型创建载荷和边界条件：

在下面的步骤中，将模型进行约束。模型外部的两条对边不能移动，另外两条边没有被约束，在模型的孔的边缘施加总大小为 1000N 的力，方向沿 *Z* 轴正向。

STEP 05 创建载荷集（spcs 和 forces）

（1）单击 Load Collectors 工具栏按钮。

（2）选择面板左边的子面板 create。

（3）单击 loadcol name = 输入 spcs。

（4）单击 color 选择颜色。

（5）单击 creation method 按钮选择 no card image。

（6）单击 create，一个新的载荷集 spcs 被创建，如图 2-7 所示。

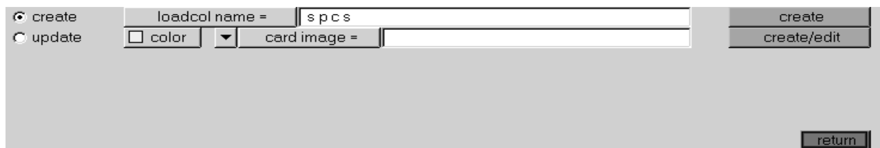


图 2-7　创建 spcs 载荷集

（7）单击 loadcol name = 输入 forces。

（8）单击 color 选择一个不同的颜色。

（9）单击 create，一个新的载荷集 forces 被创建。

（10）单击 return，回到主面板。

STEP 06 创建约束

（1）从 Model Browser 找到 LoadCollectors，用鼠标右键单击 spc，选择 Make current，选择 spc 为当前载荷集。被设置成当前集合的载荷集名称会显示成粗体，如图 2-8 所示。

（2）单击 BCs→Create→Constraints 打开 Constraints 面板，也可以通过单击 Analysis 选项卡中的 Constraints 面板进入。

（3）确保 nodes 选项被选中。

（4）单击 nodes，在弹出的扩展菜单中选择 by window。

TIPS：HyperMesh 有非常丰富的对象选取功能。例如对于在一条路径上的节点也可以通过扩展菜单中的 By Path 来选择。

（5）在图形上画一个窗口，将要选择的点全部包括在内，如图 2-9 所示。窗口是四边形，每次单击鼠标创建一个窗口的顶点。

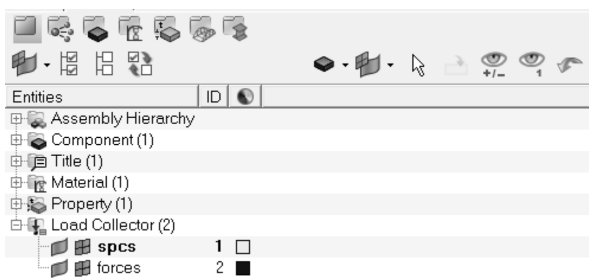


图 2-8 选择 spc 为当前载荷集

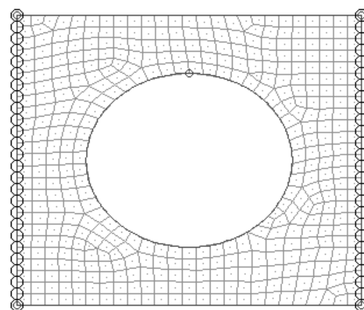


图 2-9 选择要施加单点约束的点

（6）单击 interior 旁边的复选框，单击 select entities。

（7）约束 dof1、dof2、dof3、dof4、dof5 和 dof6，将它们的值设置为 0.0。

Dofs 被选择后就被约束了，如果没被选中就是自由的。

dofs 1、dofs 2 和 dofs 3 分别表示 x、y 和 z 三个方向上的平动自由度。

dofs 4、dofs 5 和 dofs 6 分别表示绕 *X*、*Y* 和 *Z* 三个轴的旋转自由度。

（8）单击 create，这样就在选择的点上创建了约束。

（9）单击 return 返回主面板。

STEP 07 在孔边缘上的点施加载荷

（1）从 Model Browser 找到 forces，用鼠标右键单击，选择 Make current，选择 forces 为当前载荷集，如 STEP 06 中的步骤（1）。

（2）单击 BCs→Create→Forces 进入 forces 面板，也可以通过单击 Analysis→forces 进入。

（3）确保 nodes 选项被选中。

（4）单击 nodes，在弹出的菜单中选择 by window。

（5）在图形上画一个窗口，将圆周上的节点全部包括在内。窗口是多边形，每次单击鼠标创建窗口的顶点。

（6）检查 interior 旁边的输入栏，单击 select entities。

（7）设置 coordinate system 为 global system。

（8）单击 magnitude 左边的下拉按钮选择 constant vector。

（9）单击 magnitude，输入 21.277。

查看节点个数可以通过单击 Tool→count 以不退出 force 面板的形式完成。

（10）单击 magnitude 下方的按钮 direction definition，选择 z-axis。

（11）单击 create，如图 2-10 所示。

这里就在空的周围的点上创建了一系列沿 Z 轴方向的力。

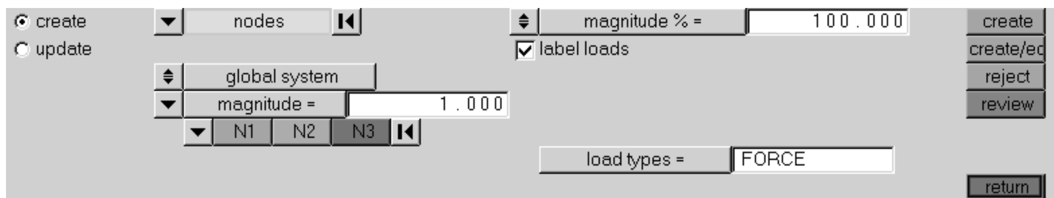


图 2-10　创建集中力载荷

（12）单击 return 返回主面板。

STEP 08 创建载荷工况

（1）单击 Setup→Create→LoadSteps 进入 Loadsteps 面板，也可以通过单击的 Analysis→LoadSteps 进入。

（2）单击 name 输入 lateral force。

（3）单击 type，选择 linear static。

（4）选中 SPC 复选框，在 SPC 右边会出现一个文本框。

（5）单击文本框，在载荷集菜单中选择 SPCS。

（6）选中 LOAD 复选框，在 LOAD 右边出现一个文本框。

（7）单击文本框，在载荷集菜单中选择 forces。

（8）单击 create。

这样就创建了 RADIOSS 的载荷工况。它引用了载荷集 SPC 中的约束和载荷集 forces 中的载荷，如图 2-11 所示。

注意：和 NASTRAN 不同，RADIOSS 不需要指定求解序列的编号（如 SOL101）来指定求解序列，软件会根据 SUBCASE 中的选择项自动确定求解序列。

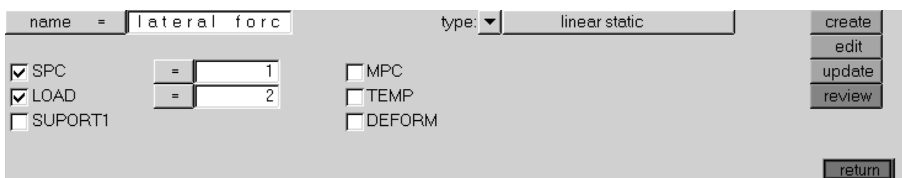


图 2-11　创建载荷步

（9）单击 return 回到主面板。

STEP 09 提交计算

（1）从 Analysis 进入 RADIOSS 面板。
（2）单击 save as 此时弹出一个扩展窗口，选择你要保存的路径。

提示：HyperWorks 不支持中文路径。

（3）在 File name 中输入 plate_hole.fem。
（4）单击 save。
（5）单击 export options 选择 all。
（6）单击 run options 选择 analysis。
（7）单击 memory options 选择 memory default。
（8）单击 RADIOSS，如图 2-12 所示。

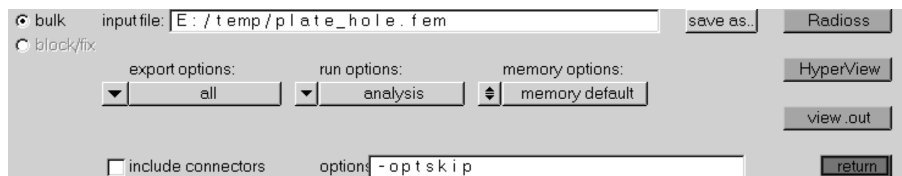


图 2-12　提交求解

提示：对于较大模型可以先在 run option 中选择 check 运行，然后在 out 文件中查看警告和错误信息以及运行需要的内存并根据该值设定相应的运行选项（如-core in），使任务可以得到较快的求解。

这就启动了 RADIOSS 求解，求解结束后，结果文件将存储在输入文件所在的目录中，plate_hole.out 用于查找错误。如果出现错误，这些信息有助于调试，在文件的存储目录中存在以下默认文件。

plate_hole.html：HTML 格式文件，包含对求解问题和分析结果的汇总信息。

plate_hole.out：RADIOSS 输出文件，包含了文件设置的具体信息，优化问题，预估计算过程中需要的磁盘空间，RAM 大小，每次优化迭代信息和计算时间，警告和出错信息。

plate_hole.h3d：HyperView 二进制结果文件，推荐使用。

plate_hole.res：HyperMesh 二进制结果文件。

plate_hole.stat：各分析过程汇总及详细的 CPU 信息。

默认输出位移和应力静态线性分析结果，下面将说明如何在 HyperView 中查看这些结果。HyperView 是一个有限元分析、多体动力学仿真、视频和工程数据分析的完整的后处理和可视化环境。

STEP 10 查看应力云图

（1）求解结束后，返回 HyperMesh，单击 HyperView。

（2）启动 HyperView，查看结果。

（3）单击 Contour 按钮。

（4）单击 Result type，选择第一个下拉菜单中的 Element Stresses [2D&3D] (t)。

（5）单击 Result type，选择第二个下拉菜单中的 vonMises。

（6）在 Averaging method 中选择 None。

注意，对于应力（应变）结果云图中的 3 个平均算法 none、simple 和 advanced 的区别为 none 表示不进行平均，即直接根据每个单元的应力进行显示；simple 表示将每个单元的 vonMises 应力平均到节点然后进行插值显示；advanced 表示先将各个应力张量在节点处平均，然后使用插值得到的新的应力张量在节点处合成 vonMises 应力。

（7）单击 Apply。

（8）单击工具栏中的视图控制按钮 Top 查看模型，如图 2-13 所示。

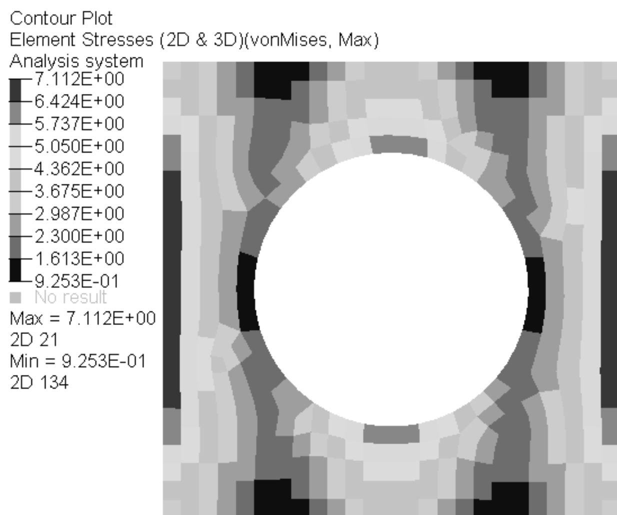


图 2-13　单元应力云图

STEP 11 查看位移云图

（1）单击 Result type 下的第一个下拉菜单，选择 Displacement (v)。

（2）单击 Result type 下的第二个下拉菜单，选择 Mag。

（3）单击 Apply。

STEP 12 查看变形

（1）单击工具栏中的 Iso 视图查看模型。

（2）单击变形工具栏按钮。

（3）在 Result type 选择 Displacement(v)，在 Scale 选择 Scale factor，在 Type 选择 Uniform。

（4）在 Value 旁边的文本框中输入 500，这就意味着位移结果被放大 500 倍。

（5）在 Show 中选择 Wireframe。

（6）单击 Apply。

模型的位移变形图应该是可见的，覆盖在未变形的网格上。变形情况如图 2-14 所示。

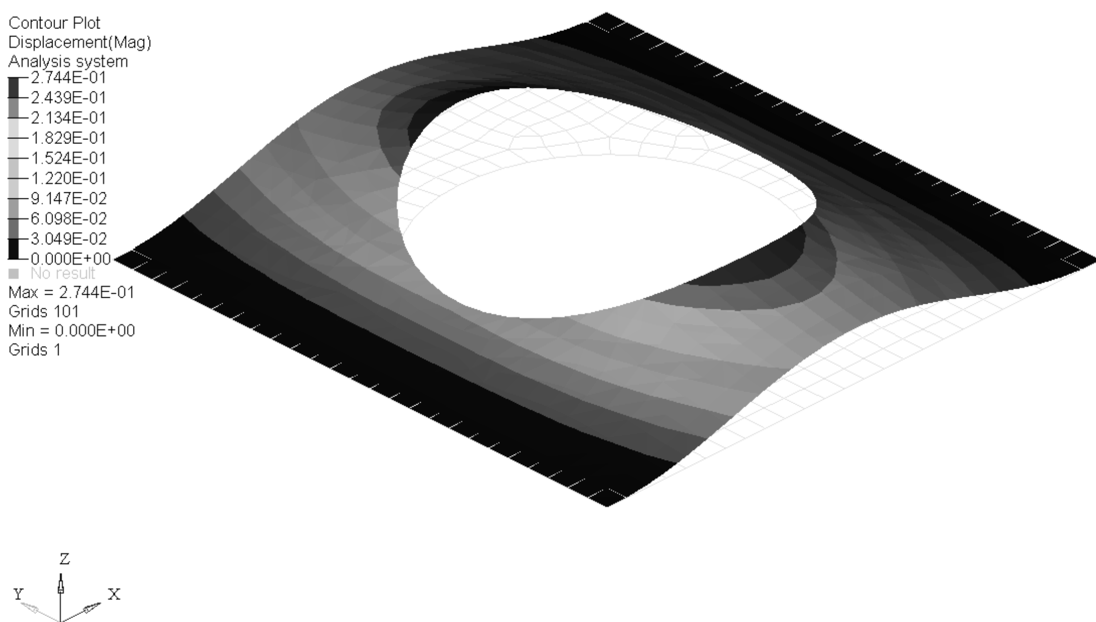


图 2-14　位移放大 500 倍后的变形图

2.2 自由体载荷提取技术（FBD）

本节将学习以下内容：

（1）理解用于抽取合力和合力矩的 HyperMesh FBD(free body diagrams)功能，定义用于计算力和力矩的截面。

（2）通过在 HyperMesh 中使用 FBD 来理解载荷路径，把自由体载荷输出并加载到细化模型中作为子模型的边界条件。

过程如图 2-15～图 2-17 所示。

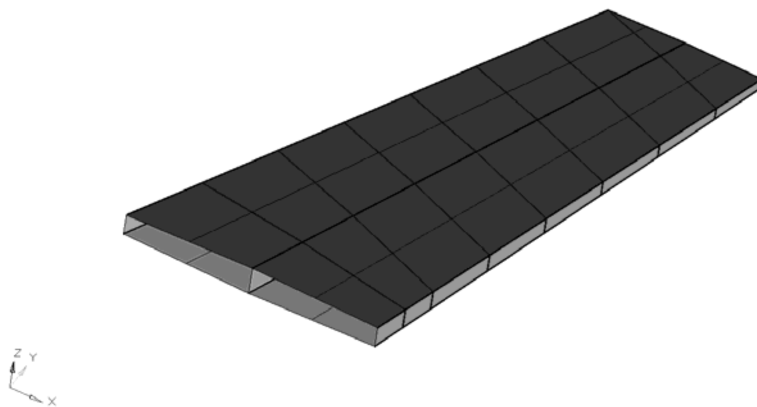


图 2-15　机翼的全局载荷模型

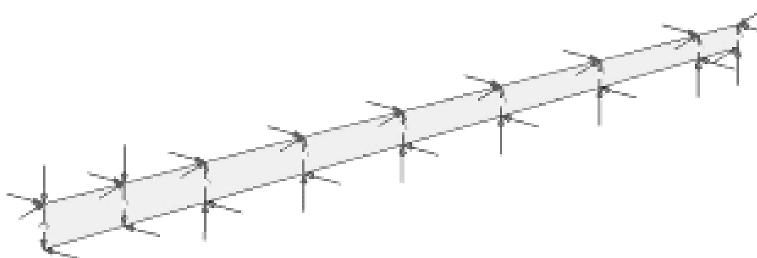


图 2-16　全局模型中需要提取载荷的单元集

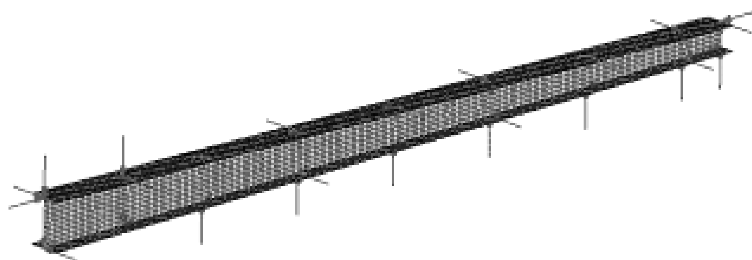


图 2-17　对细节模型施加从全局模型得到的自由体载荷

本节包括两个练习，下面先讲解练习 1。

1．练习 1

利用合力和合力矩功能从全局载荷提取载荷并创建剪力-弯矩图和土豆图。

STEP 01 为 Spar2 创建一个坐标系

（1）打开 HyperMesh，选择 RADIOSS (BulkData)用户模板。

（2）打开 icw_ex1.hm 模型文件。

（3）从菜单栏中选择 Tools→Set Browser。

（4）单击 Sets→Elements。

（5）用鼠标右键单击 Spar2 单元集，选择 Isolate，此时 Spar2 的网格就会在图形区单独显示，可以在 visualization 工具栏中选择 Shaded Elements and Mesh Lines （）进行着色显示。

（6）从菜单栏中选择 Geometry/Create/Nodes/Interpolate Nodes 进入 Create Nodes 面板来创建 Spar2 左端的节点。

（7）对于 Number of nodes between 输入 1，选择模型中最左上方的点和左下方的点，如图 2-18 所示，单击 create。

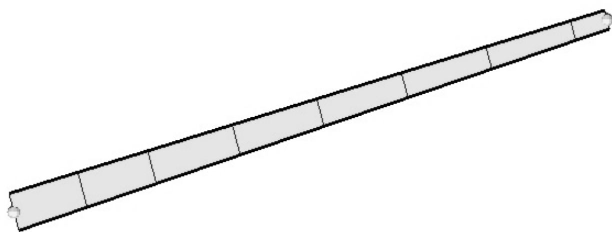


图 2-18　创建中间节点

（8）对 Spar2 右边的点重复上步骤（7）的操作。

（9）单击 return 退出 Create Nodes 面板。

（10）通过以下任一种方式进入 Systems，单击菜单 Geometry→Create→Systems，从面板区选择 1D→systems 面板。

（11）进入 create by axis direction 面板，以 Spar2 最左边的中点为坐标原点，并沿长度方向建立直角坐标系的 X 轴。

（12）单击 origin 并且选择最左边的中点。

（13）选择最右边的中点处作为 X 轴上的点。

（14）选择左上方的点作为 xy 平面上的点。

（15）切换到 rectangular，单击 create。

（16）单击 return 退出 Systems 面板。

STEP 02 为 Spar2 创建截面

（1）单击 Post→Free Body→Cross-Section，打开 FBD Cross-section Manager。

截面定义包含以下几项：

1）用于定义截面的节点（这些节点定义了截面并且决定力和力矩在截面的哪一边进行计算）的 element set（单元集），只需要包括与定义截面的点相连的一侧截面的单元，其他单元可以被选中但对结果没有影响。

2）定义截面几何的 node set（节点集）。

3）summation node 可以是模型中任何一个点，也可以自动设置为截面中心，截面中心的计算使用组成截面的节点坐标，忽略单元厚度的变化。所以，计算中心和理论中心有微小的区别（当截面为变厚度时）。

4）定义截面合力和合力矩输出用的结果坐标系（可选）。

（2）在 FDB Cross-section Manager 面板单击 Advanced options 展开显示 Auto create cross-section 列表。利用列表创建沿着 Spar2 长度方向的截面。在这些截面上抽取合力和合力矩数据用于创建剪力–弯矩图和土豆图。定义截面有两种方法，一种是手工方法，另一种是高级方法。高级方法会自动创建“连续”截面，在这个练习中将用到高级方法，如图 2–19 所示。

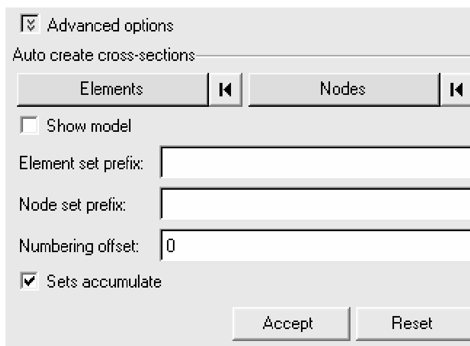


图 2–19　使用高级方法创建连续截面

（3）单击 Elements 两次，然后选择 Spar2 的所有单元并单击 proceed，如图 2–20 所示。

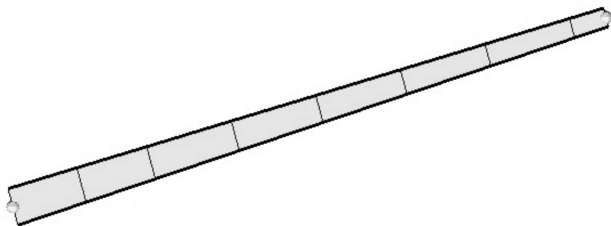


图 2–20　选择单元

（4）单击 Nodes 两次，选择组成 Spar2 第一个截面的左侧顶部和底部的节点并单击 proceed，如图 2–21 所示。

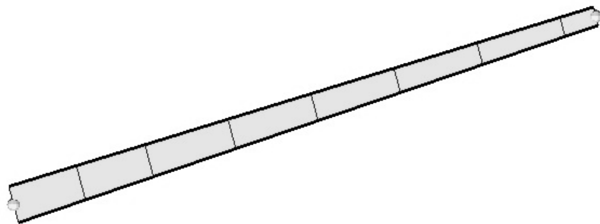


图 2–21　选择节点

（5）在 Element set prefix 中输入 Spar2_E，在 Node set prefix 中输入 Spar2_N。

因为要在 cross-section manager 工具创建必要的单元集和节点集，所以必须为它们定义字符串前缀。通过为这个字符串设定一个递增数字来为每个截面创建单独的名字，还可以为第一个 set 的数值设置一个偏置值（作为起始值），最终 set 名称由前缀和该数值共同决定。

（6）选中 Sets accumulate 并单击 Accept。

这样就通过 Auto create cross-sections 创建了截面列表，如图 2-22 所示。

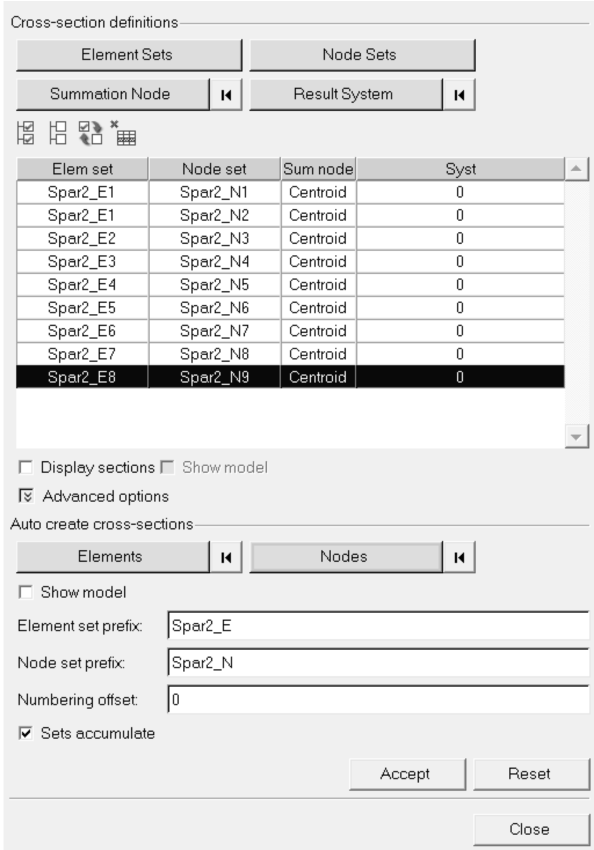


图 2-22　截面列表

（7）单击 Advanced options，关闭 Auto create cross-sections 窗口。

（8）可以选择 Display sections 查看选择的截面。图形区域会对定义截面的单元集、节点集、sum node 和结果坐标系进行更新。另外，如果选中了 Show model 复选框，在图形区域中会显示整个模型，被选中的截面会以红色高亮显示，其他部分以透明方式显示。

（9）在 spreadsheet 选择第一个截面（Spar2_E1，Spar2_N1），按住〈shift〉键，选择最后一个截面（Spar2_E8，Spar2_N9）去更新它们的结果坐标系。

更新任何一个或者多个截面，利用 Ctrl/Shift 键从列表中选择截面，然后单击 Summation Node 或者 Result System 去更新定义。

（10）单击两次 Result System，选择位于 Spar2 左端中部的 system，单击 proceed。所有截面更新为结果坐标系 102，如图 2-23 所示。

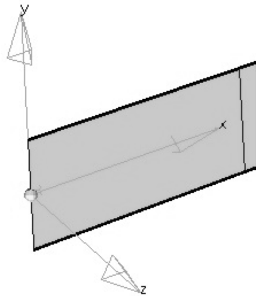


图 2-23　截面坐标系

（11）单击 Close 退出 FBD Cross-Section Manager。

STEP 03 提取 Spar2 所有载荷工况下的所有截面的力和力矩

（1）单击 Post→Free Body→Resultant Force and Moment，打开 Resultant Force and Moment。

（2）在.op2 file 窗口中选择 icw.op2。

（3）在 Loadsteps 列表中选择所有的工况。

（4）在 Cross-sections 列表中选择 Spar2 的所有截面。

（5）合力和合力矩的输出选项如表 2-1 所示。单击 Coordinate system 两次。

表 2-1 合力和合力矩的输出选项

功　能	描　述
Coordinate System	定义仅用于节点位置（*x*，*y*，*z*）输出的坐标系。该坐标系不影响合力和合力矩的转换，合力和合力矩由每个截面的结果坐标系定义
Zero tolerance	考虑到数值因素，任何小于该值的数将被置 0
Create load collectors	创建包含合力和合力矩的载荷集，便于在图形区域显示为力和力矩矢量
Show summary table	弹出一个类似于.csv 文件（逗号分隔）的窗口显示格式化的结果。用于快速查看数据（无需打开电子表格或文本文件）
Create .csv file	创建一个.csv 文件，包含合力和合力矩的结果，可以直接使用 Excel 打开
Create .fbd file	创建一个.fbd 文件，包含合力和合力矩的结果。该文件可直接导入 HyperGraph 创建剪力-弯矩图和土豆图

（6）选择 Spar2 左端中部的坐标系 102，然后单击 proceed（必须先在 Model Browser 显示 system 102 Longeron2 坐标系）。

（7）设置 Zero tolerance 为 0.01。

（8）选中 Create load collectors 复选框，并选择一种默认颜色（可选）。

（9）选中 Show summary table 复选框。

（10）选中 Create .csv file 复选框，单击 select from list.（）选择一个存在的文件.csv（在后面追加数据）或者输入一个新的文件名。在本例中输入 icw_res_force_moment.csv。

（11）选中 Create .fbd file 复选框，单击 select from list.（）选择一个存在的文件.fbd（在后面追加数据）或者输入一个新的文件名。在本例中输入 icw_res_force_moment.fbd（默认情况保存到 HyperMesh 启动目录，可以更改）。

（12）单击 Accept 计算所有选择的工况下每一个截面的合力和合力矩。Resultant Force and Moment Output Summary 窗口显示了合力和合力矩计算结果（见图 2-24）。对于任何一个截面，都有一个单独的工况数据块。该数据块包含了截面的节点力、力矩，以及这些节点力和力矩关于 summary node（本例中是截面的中心）的合力。需要注意的是，因为合力向量在 sum node 处产生的附加力矩也要考虑进来，所以合力矩并不是简单地将 *Mx*、*My*、*Mz* 直接叠加，每个点的 *Fx*、*Fy*、*Fz* 的合力则是通过简单相加得到。

（13）（可选）双击文件 icw_res_force_moment.csv，用 Microsoft Excel 打开.csv 文件。

（14）（可选）用任何一个标准文本编辑程序打开.fbd 文件 icw_res_force_moment.fbd。该文件所包含的结果和图 2-24 中的列表是一样的，但是以压缩格式存储，用于在 HyperGraph

中为各个截面创建剪力–弯矩图和土豆图。

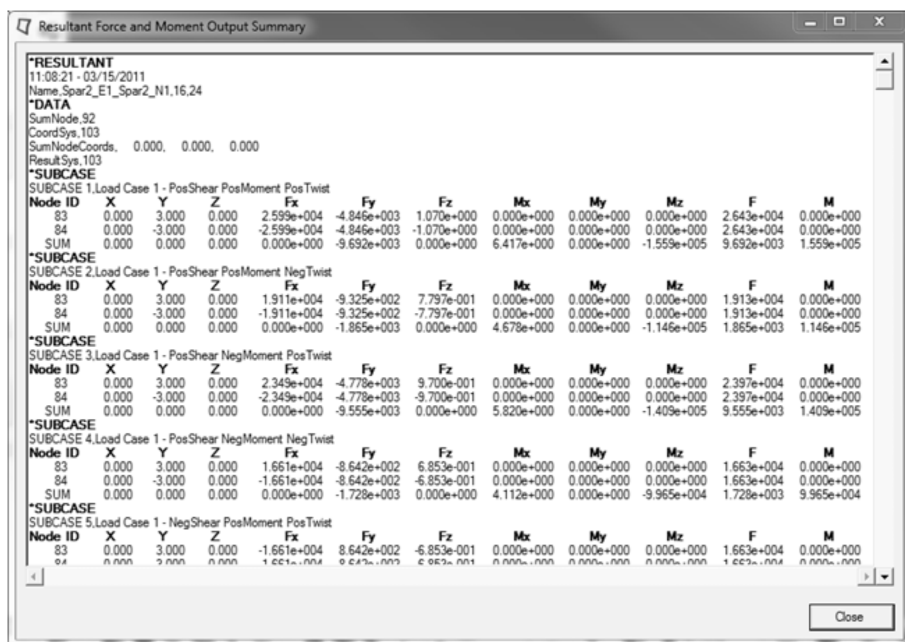


图 2–24　截面的合力和合力矩计算结果汇总

（15）单击 Close 退出 Resultant Force and Moment。

STEP 04 利用 Free Body Results Manager 在图形区域检查合力以及合力矩矢量

（1）单击 Post→Free Body Results Manager，打开 FBD Results Manager。

（2）单击 Element Set 两次，单击 set，选择 Spar2_E2 并单击 proceed。

（3）在 Free Body Results Manager 窗口中选中 Show model 复选框，此时整个模型中被选择的单元会以红色高亮显示，其他部分以透明显示，方便在模型中找到 element set（单元集）。

（4）在 Results type 中选择 Resultant Force and Moment。该操作在数据库中搜索含有力和力矩结果的 loadsteps，并展开 loadsteps 列表。

（5）在 Loadsteps 中选择 SUBCASE1。该操作在数据库中搜索含有力和力矩结果的 node sets，并展开列表。

（6）在 Node sets 中选择 Spar2_N3。该操作在数据库中搜索含有力和力矩结果，并展开列表。

（7）对于 Display options 选择 *Fy*（剪力—结果坐标系的 *Y* 轴，在腹板平面内）和 *Mz*（主弯矩—结果坐标系的 *Z* 轴，垂直于腹板平面）。

为了查看截面结果的输出坐标系，可以使用 Free Body Cross-Section Manager 去查看定义的截面。该操作将会显示单元集、节点集、结果坐标系和被选择的截面中定义的 summation。选择力的分量在图形区域查看大小和方向（可选）。图形区域可以显示单个或多个力矩向量，以方便数据采集和报告。

（8）（可选）选择 Update load collector color 并选择 color 去改变载荷向量的颜色。

新设置的颜色只赋予给了选择的载荷分量并在数据库中保存。因此，该操作可以为任意单个或多个载荷向量改变颜色。

（9）单击 Accept 在图形区域显示合力和合力矩向量，如图 2-25 所示。

（10）（可选）按照步骤（2）～（4），继续查看其他截面的合力和合力矩向量。

（11）单击 Reset 清除显示并重置列表。

（12）单击 Close 退出 FBD Results Manager。

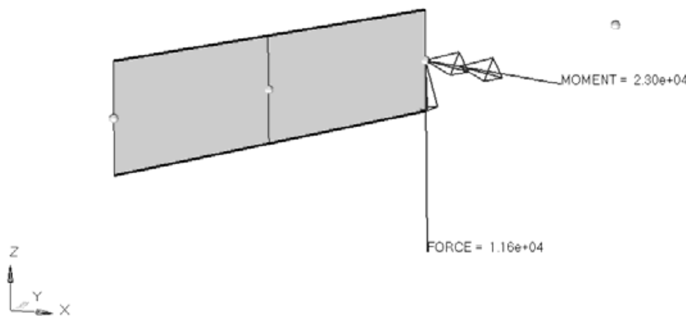


图 2-25　合力和合力矩向量

STEP 05 为 Spar2 中被选择的截面创建 Potato Plots（土豆图）

（1）从开始菜单打开 HyperGraph 并单击 Add Page 按钮创建一个新页面。

（2）单击菜单 Tools→Free Body Diagrams→Potato Plot，打开 Potato Plot 对话框。

（3）单击 Select from List（）打开文件 icw_res_force_moment.fbd。

（4）在 Sections 列表中选择截面 Spar2_E1_Spar2_N1 作为要创建 Potato Plots 的截面。

Potato Plots（土豆图）为每一个含有所有工况数据点的截面创建一个单独的图表。Potato Plots 在给定一个截面通过剪力-弯矩图能够有效地为所选 loadsteps 做一个切片。因为 Spar2_E1_Spar2_N1 是机翼 Spar2 的根部，因此这个地方受力最大，此处的工况可以被看做临界载荷工况。Potato Pots 可以通过定义截面上最大和最小载荷来找出临界工况。在该例中，将会讲解怎样识别最大和最小剪力 Fy 和弯矩 Mz。此外，也可以使用其他方法来找出临界工况。

（5）从 Loadsteps 列表中，通过列表框旁边的 filter buttons 或者用〈Ctrl〉/〈Shift〉键选择所有 loadsteps。

（6）在 Potato Plots 中 component 选择 Fy（剪力）。

（7）对于 Y Component 选择 Mz，单击 Add plot。

注意：也可以通过选择其他 *x* 和 *y* 后单击 Add Plot 来创建其他 Potato Plots，可以通过在

电子表格区域选择 Plots 单击 Delete Plots 删除 Plots。

（8）（可选）在 Plot Titles 中输入 Title 和 Subtitle。

（9）在 Plot Options 中的 Reverse sign 下拉列表中选择 Spar2_E1_Spar2_N1。

（10）在底部的下拉列表中选择 Reverse selected section。

（11）选中 Label points:Loadstep 复选框。

（12）单击 Apply 创建 Potato Plots，如图 2-26 所示。

由于只选中了一个截面，结果中只创建了一张图表。Potato Plots 主要用来确定最大或者最小的工况，从截面 Spar2_E1_Spar2_N1 的 Potato Plot 中可以看到剪力和剪力矩的最大和最小工况是 SUBCASE9、SUBCASE11、SUBCASE14 和 SUBCASE16。在 Spar2 的后续设计中将会考虑这些临界工况（作为所有工况的子集）。在练习 2 中，将抽取工况的载荷应用于 Spar2 的细化模型的分析和设计。

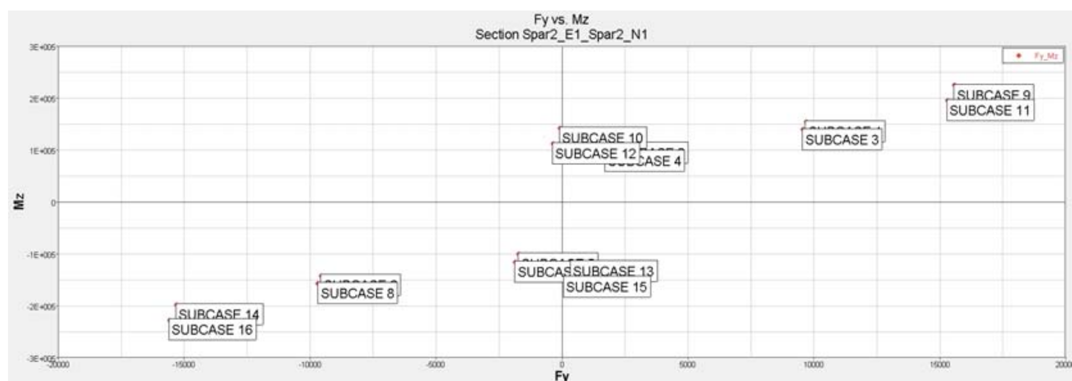


图 2-26　载荷步的土豆图

STEP 06　为 Spar2 创建所选工况的剪力-弯矩图

（1）单击 Add Page 按钮创建一个新的页面。

（2）单击菜单 Tools→Free Body Diagram→Shear Moment Plot，打开 Shear Moment Plot 面板。

（3）单击 Select from List（）导入 icw_res_force_moment.fbd 文件。

（4）从 Sections 列表中，选择所有与 Spar2 有关的截面（Spar2_E1_Spar_N1～Spar2_E8_Spar2_N9）。

（5）在 Loadsteps 中选择 STEP 05 中确定的临界工况 SUBCASE 9、SUBCASE 11、SUBCASE 14 和 SUBCASE 16。

（6）在 VMT Plots 中，X component 选择 X。

选择 X 是因为合力和合力矩的提取是在坐标系 102 下进行的，而 102 坐标系的 *X* 轴为 Spar 的长度方向。

（7）在 VMT Plots 中，Y component 选择 Fy 和 Mz 用于绘制 Spar2 剪力和主弯矩图。

（8）（可选）在 Plot Titles 面板中输入 Title 和 Subtitle。

（9）在 Plot Options 中的 Reverse sign 下拉菜单中选择截面 Spar2_E1_Spar2_N1。

（10）在底部的下拉菜单中选择 Reverse selected section。该选项允许改变单个或多个截面的结果的符号。该操作是非常有用的，因为该练习中所有的截面都是从右边定义的，然而第一个截面[Spar2_E1_Spar2_N1]在左面没有单元，只能从左边定义。通过单元和节点集定义的截面从左边定义还是从右边定义取决于任何给定节点定义的截面的单元。所以任何给定的截面可以从左边或者右边定义，两种不同的定义方式的不同点是结果大小相同方向相反。对于剪力-弯矩图，所有选择的截面应该从同一个方向定义，这样的结果图才是有效的。

（11）确定 Envelop results 的复选框没有被选中。

（12）选择 One Plot Per Component 窗口布局（Layout）。该操作会影响结果图的数量，选项如下：One plot per loadstep，One plot per Y Component 和 One curve per plot。在这个例子中，因为选择了 4 个工况和两个 Y components，所以将会有 8 条曲线。这 8 条曲线在几张图中显示取决于 layout 选项。对于本操作，One Plot per loadstep 将会有 4 张图，因为有 4 个工况。One Plot per Y component 将会有两张图，剪力和剪力图分别在一张图上显示。

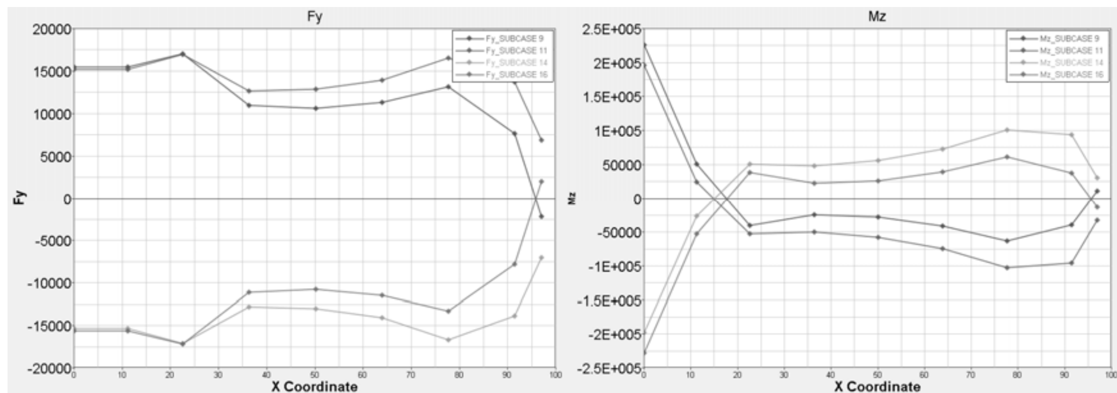


图 2-27　剪力弯矩图

（13）单击 Apply 生成剪力-弯矩图，如图 2-27 所示。

这些图可以用于传统的材料力学计算。例如，使用 S = My/I 和 T = VQ/IT 计算各种截面的应力。图中提供了方程中的 M（弯矩）和 V（剪力）值，截面参数可以通过 HyperBeam（HyperMesh/1D/HyperBeam）获取。

2．练习 2

从全局载荷模型中抽取自由体载荷并传递给详细模型作为边界条件—子模型技术（注意不是子结构技术，两者是完全不同的）。

STEP 01　使用 FBD 功能为 Spar2 提取自由体载荷

（1）从练习 1 继续，或者打开 icw_ex2.hm 模型。

（2）单击菜单 Post→Free Body→Force，打开 FBD Forces 面板。

（3）如果 icw.op2 已经载入，继续；否则载入 icw.op2。该文件包含使用 GPFORCE 输出

的节点力数据，所有包含节点力输出的工况都会在列表中列出。

（4）在 Loadsteps 列表中选择 SUBCASE 9、SUBCASE 11、SUBCASE 14 和 SUBCASE 16，这些是在练习 1 的 STEP 05 中得到的临界工况。

（5）在 Entity selection 区域，单击两次 Element Set。

（6）单击 set，选择 Spar2 并单击 proceed。

（7）单击 Result System 两次选择坐标系 102（参考练习 1），单击 proceed。

注意：可能需要先将坐标系 102 在 Model browser(Model tab) 中显示出来。自由体载荷将在结果坐标系中输出。

（8）单击 Summation Node 两次，选择左侧中点，然后单击 proceed。Summation Node 用于求所有载荷的合力。如果是自由体（全部载荷），合力应该为 0。因此，通常的合力结果为 0。但是如果求自由体载荷时没有包含所有载荷，可以在 Summation Node 得到我们关心的自由体等效总载荷（只有施加载荷或反力载荷）。

FBD Forces 的 Output options 描述如下。

FBD type：定义在 FBD 中考虑的节点力（GPFORCE）类型。GPFORCE 的数据可以包括 element、applied、SPC 和 MPC forces。FBD 类型包括 All loads、Applied loads only 和 Reaction loads only（只考虑 SPC 和 MPC 反力）。

Create load collectors：创建包含合力和合力矩的 load collectors（载荷集），便于在图形区域显示为力和力矩矢量。

Show summary table：弹出一个类似于.csv 文件（逗号分隔）的窗口显示格式化的结果，用于快速查看数据（无需打开电子表格或文本文件）。

（9）FBD type 选择 All Loads。

（10）Zero tolerance 输入 0.01。

（11）激活 Create load collectors 并选择一种默认颜色。

（12）激活 Show summary table。

（13）激活 Create .csv file 选择一个存放目录并输入 icw_fbd_force.csv。

（14）单击 Accept 对所有选择的工况进行载荷抽取。

（15）（可选） 打开 icw_fbd_forces.csv 查看结果。

（16）单击 Close 退出 FBD Forces 面板。

STEP 02 使用 FBD Results Manager 在图形区域查看 FBD force 矢量

（1）单击菜单 Post→Free Body Results Manager，打开 FBD Results Manager 面板。

（2）单击 Element Set 两次，单击 set 选择 Spar2，单击 select 然后单击 proceed。

（3）（可选）选中 Show model 复选框显示整个模型，选择的 set 中的单元会以红色高亮显示，其他部分以透明方式显示。

（4）Results type 选择 FBD Forces – All Loads。

（5）Loadsteps 选择 SUBCASE 9。

（6）Display options 选择 Fy （剪力）。

（7）（可选）选择 Update load collector color 并选择一种颜色来改变载荷矢量的颜色。

（8）单击 Accept 在图形区查看自由体载荷，如图 2-28 所示。

（9）单击 Reset 清除显示并重置列表。

（10）单击 Close 退出 FBD Results Manager 面板。

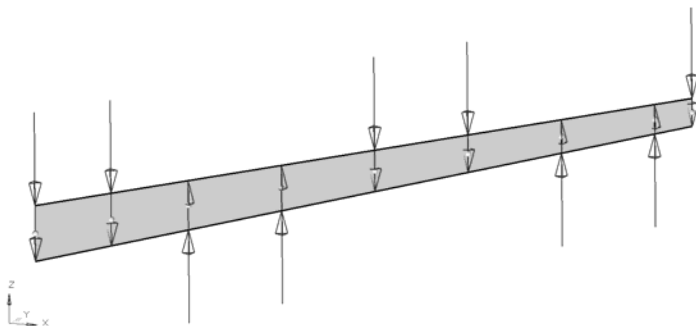


图 2-28 查看自由体载荷

STEP 03 使用 FBD Export Manager 输出 FBD 力到.fem 文件

（1）单击菜单 Post→Free Body Export Manager，打开 FBD Export Manger 面板。

（2）单击 Element Set 两次，单击 set 选择 Spar2，单击 proceed。

（3）Results type 选择 FBD Forces – All Loads。

（4）Loadsteps 选择 SUBCASE 9， SUBCASE 11， SUBCASE 14， SUBCASE 16。

（5）激活 Create appropriate loadsteps 选项，为 Output file 选择文件存放目录并输入 spar2_fbd_forces.fem，单击 Add to export 输出。

该操作将显示与当前选择的 FBD 结果相关的已选择的 loadsteps 的载荷集。可以选择其他 loadsteps 并单击 accepted 增加其他 loadsteps 的显示，也可以通过选择其他 element set 并单击 accepted 增加其显示。单击 Reset 可以清除当前显示。

（6）单击 Export。该操作将显示的载荷及其他相关卡片输出到指定的输出文件。该文件可以在导入到其他的 HyperMesh 模型（细节模型），成为该细节模型的边界条件（还需要为模型增加限制刚体的约束）。

（7）单击 Reset。该操作清除当前显示。

（8）单击 Close 退出 FBD Export Manager 面板。

（9）（可选）单击菜单 File→Save as，将文件另存为 hm 数据库文件 icw_final.hm。

（10）单击菜单 File→Exit，退出 HyperMesh。

STEP 04 将.fem 中的 FBD forces 导入到细节模型并求解

（1）打开 HyperMesh，并打开模型文件 spar2_ex2.hm。

（2）单击菜单 File→Import，打开 Import 面板。

（3）Import type 选择 FE Model，File type 选择 RADIOSS (Bulk Data)，并导入文件 spar2_fbd_forces.fem，单击 Import。该操作将从全局模型中得到的自由体载荷导入到细节模型中。下一步将自由体载荷与细节模型相关联，对模型做一些清理，定义新的 loadsteps（包含自由体载荷和用于限制刚体位移的约束）并求解模型。

（4）单击菜单 Mesh→Check→Nodes→Equivalence 进入 Edges 面板。对导入的自由体载荷的节点和细节模型的相同位置节点进行 equivalence（合并）操作。

（5）将选项从 comps 切换到 elems。

（6）单击 elems 从扩展面板中选择 displayed。

（7）单击 preview equiv。

（8）单击 equivalence 对 18 个加载节点和 Spar2 上相应节点进行 equivalence（合并）操作。

注意：可以通过在曲面上放置硬点使模型在划分网格的时候在希望的地方（此处为加载点）放置节点，也可以通过 R 类单元（RBE2 或 RBE3）将加载点和模型节点连接起来。

（9）单击 return 退出 Edges 面板。

（10）使用快捷键 F2 进入 Delete 面板。

（11）单击 comps，选择 TempMass。单击 select。

（12）单击 delete entity 删除 TempMass component。

（13）单击 return 退出 Delete 面板。

（14）在 Model browser 用鼠标右键单击 LoadCollector，选择 Hide 隐藏所有载荷。

（15）根据下面的步骤定义约束刚体位移的自由度约束：

创建一个 load collector 用于放置约束。单击菜单 Collectors→Create→Load Collectors 进入 loadcollectors 面板。

在 create 子面板的 loadcolname =后输入名称 Const。单击颜色选择红色。

切换为 no card image，单击 create。

注意：该操作自动设置新创建的 Const 为当前的 load collector，新创建的载荷和约束将自动被放置在当前的 load collector 中。

为将要创建位移约束的 3 个点赋一个坐标系。单击菜单 Mesh→Assign→Node Analysis System，进入 Systems Assign 子面板。

选择图 2-29 中的 3 个节点，单击 system 选择坐标系 102（左下角位置）。

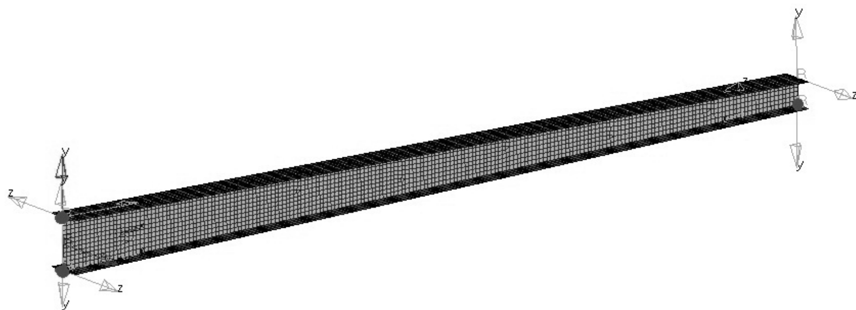


图 2-29　选择坐标系

单击 set displacement，然后单击 return 退出 Systems 面板。

在中间隔板左下端节点施加一个约束。单击菜单 BCs→Create→Constraints 进入 Constrains 面板。

选择左下端节点并选择 dof1、dof2 和 dof3，单击 create。

选择左上端节点并选择 dof1 和 dof3，单击 create。

选择右下端节点并选择 dof3，单击 create。

注意到以上创建的约束只是限制了结构的刚体位移，没有对结构的相对变形进行任何的限制。在有的结构上（如弯曲的结构）这样的点可能无法在结构的现有节点上找到，这时可能需要在空间上创建一个点，然后使用 RBE2 或 RBE3 单元与结构节点相连。如果使用 RBE3 还需要设置响应的 UM 选项。另外一种处理方法是使用惯性释放进行分析，以上用法请参考惯性释放的相关章节。

单击 return 退出 constraints 面板。

（16）为 4 个自由体 loadsteps 更新约束，操作如下：

单击菜单 Setup→Edit→LoadSteps，进入 loadsteps 面板。

单击 name=并选择 SUBCASE 9。

将分析类型切换为 linear static。

选择 SPC，单击=并选择 Const。

单击 update。

为 SUBCASE 11、SUBCASE 14 和 SUBCASE 16 重复以上步骤。

（17）单击菜单 Setup→Create→Control Cards，进入 Control Cards 面板。

（18）单击 FORMAT。

（19）number_of_formats 输入 2 并按〈Enter〉键。

（20）两个 FORMAT 分别选择 HM 和 OUTPUT2。

（21）单击 return 指定输出文件格式。*.res(HM)用于 HyperMesh 后处理，*.op2 用于 HyperView 后处理。

（22）单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST→DISPLACEMENTS，然后单击 return 完成位移输出请求。

（23）单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST→STRESS，然后单击 return 完成应力输出请求。

（24）单击 return 退出 control cards 面板。

（25）单击菜单 File→Save As，将文件另存为 spar2_ex2_analysis.hm。

（26）单击菜单 Applications→RADIOSS，进入 RADIOSS bulk 子面板运行模型。

（27）run options 选择 analysis。

（28）export options 选择 all。

（29）单击 RADIOSS 输出求解模型并在 RADIOSS 中使用 Bulk Data 格式进行求解。如果在 options 栏有 optiskip，则可以直接在单击 RADIOSS 求解前将其删除。

（30）RADIOSS 求解完成后单击 return 退出 RADIOSS 面板。

（31）在 Post 页面单击 Deformed 面板查看分析结果。

（32）单击 Simulation=选择 SUB9 – PosShearPosMoment PosT。

（33）单击 data type=选择 Displacements。

（34）单击 deform 查看变形，如图 2-30 所示

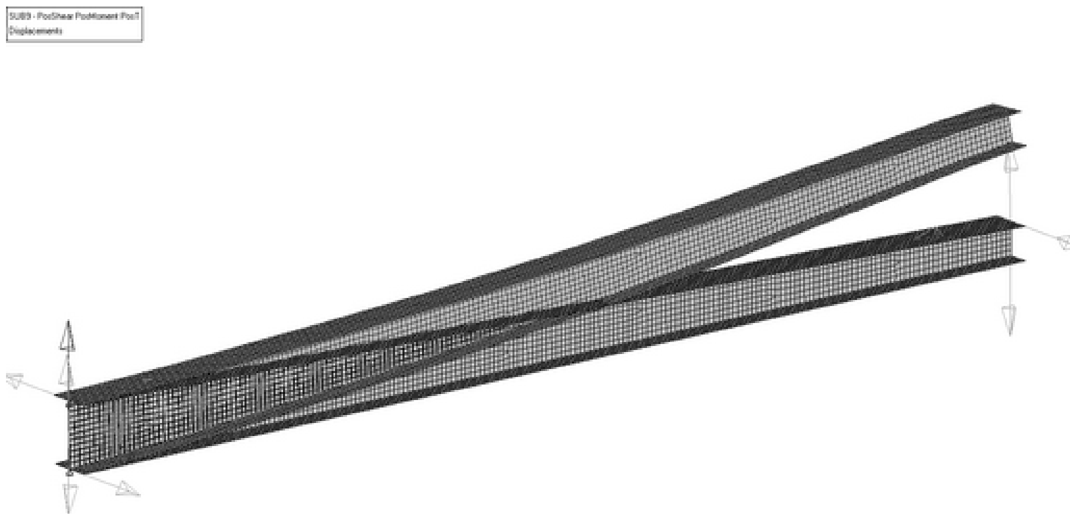


图 2-30　局部结构变形

（35）单击 return 退出 deformed 面板。

（36）在 Post 页面，单击 contour 进入 contour 面板查看分析结果。

（37）单击 Simulation=选择 SUB9 – PosShearPosMoment PosT。

（38）单击 data type=选择 Von Mises Stress。

（39）单击 POST→Contour→legend 子面板。

（40）将 find maximum 切换为 maximum=并输入 100000。

（41）单击 contour 在图形区域查看云图，如图 2-31 所示。

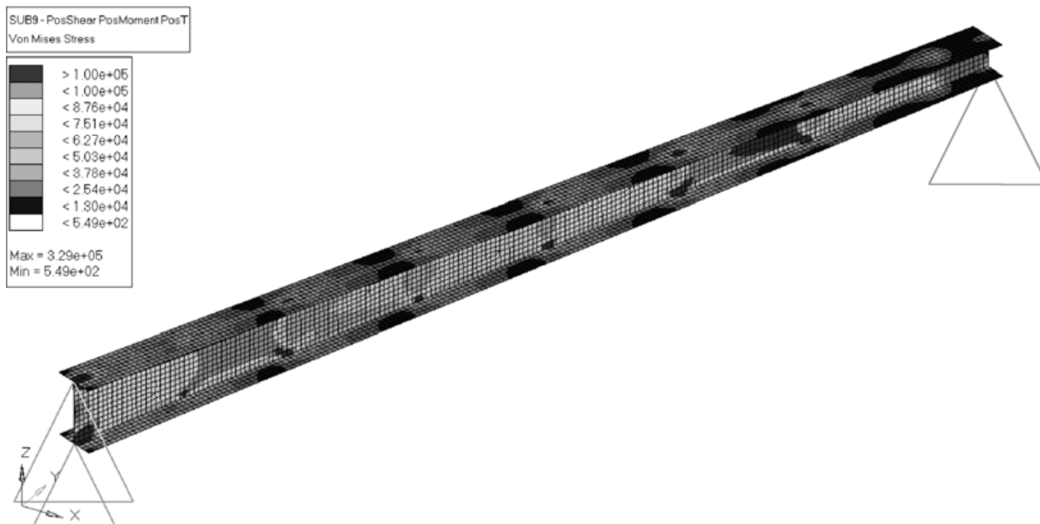


图 2-31　局部结构应力

（42）（可选）继续使用 contour 面板查看其他结果。

（43）单击 return 退出 contour 面板。

（44）（可选）单击菜单 File→Save，保持文件。

（45）单击菜单 File→Exit，退出 HyperMesh。

注意：本例使用了 HyperMesh 的后处理模块，在后续例子中一律使用 HyperView 进行后处理。HyperView 和 HyperGraph 是 Altair 公司推荐使用的后处理模块。本例的细节模型和原始模型中局部的形状有所不同，实际应用中也经常只是对局部模型进行细化而不改变形状。

2.2.3 HyperBeam 的使用

本例介绍使用 HyperBeam 创建一维梁单元截面。本例中介绍两种创建梁截面的方法，然后创建梁单元，再创建载荷，最后提交线性静态分析求解。本例使用的 T 形截面以及用户自定义的任意截面都是根据剪切中心（剪切中心的概念是：当载荷作用线通过该点时梁截面不会发生扭转）进行定位的，梁单元的定位较为复杂。

STEP 01 启动 HyperMesh 并且设置 RADIOSS（Bulk Data）用户配置文件，并打开模型

单击 File→Open，打开光盘中的模型 HyperBeam.hm。模型中已包含了二维网格及其对应的属性和材料。

STEP 02 使用 HyperBeam 创建一个标准 T 形梁截面

（1）在一维面板中，单击进入 HyperBeam。

（2）选择 standard section 子面板，确认 standard section library 选为 HYPER BEAM，把 standard section type 切换为 standard T section，单击 Create，弹出一个新的面板。

（3）在左边 Parameters Difinition 中，按图 2-32 修改 4 个参数。

Parameter Definition	Value
Dimension (a)	20.0000
Dimension (b)	20.0000
Thickness (t1)	3.0000
Thickness (t2)	4.0000

图 2-32　梁截面尺寸

（4）注意观察图形显示区域的截面，表示形心，表示剪心。此截面中，剪心位于 t2 宽度的中点（提示：后面需要使用到这条信息，解释见剪心介绍部分）。

（5）单击 File→exit，退出。

STEP 03 使用 HyperBeam 创建用户自定义截面

（1）再次单击进入 HyperBeam 面板。

（2）选择 shell section 子面板，单击选择框 lines 并选择 all，选中模型中所有的几何线，然后把 section base node 切换为 shear center，其他保持默认值，单击 create。

（3）左边树图中选择 shell_section.1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Edit，把 Part Thickness 改成 2。

（4）注意观察形心和剪心的位置，以及右侧 Data 数据项。当前局部坐标系在剪心，所以剪心及形心坐标如图 2-33 所示。

Shear center :			Centroid :		
Local			Local		
Ys	=	0.0000	Yc	=	45.4235
Zs	=	0.0000	Zc	=	-15.0777

图 2-33　剪心及形心坐标

记录下形心的坐标，后面需要使用。截面相对于当前坐标原点及相对于形心的转动惯量如图 2-34 所示。

Local			Centroidal		
IY	=	1.7645e+005	Iy	=	8.5900e+004
IZ	=	1.0650e+006	Iz	=	2.4317e+005
IYZ	=	-2.5170e+005	Iyz	=	2.1096e+004

图 2-34　截面相对于当前坐标原点及相对于形心的转动惯量

（可选）左边树中选择 shell_section.1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Edit，选择 Reorient 选项卡。任意改变坐标原点位置及 *Y* 轴角度，观察 Data 数据项的变化。请记住更改的操作，以便能够把坐标系回归到原始位置；否则请重新创建这个截面。

（5）单击 File→exit，退出。

STEP 04 创建 Component 及对应的梁单元属性及材料

（1）创建属性，单击 Properties 按钮，进入 create 子面板。

（2）设置如图 2-35 所示，单击 create。

（3）单击 Components 按钮，进入 create 子面板。

（4）设置如图 2-36 所示，单击 create。

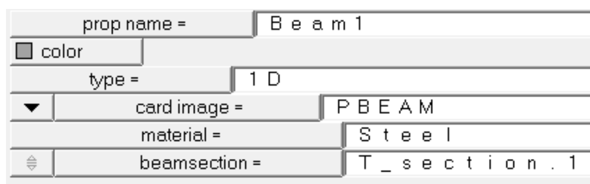


图 2-35　创建梁单元属性

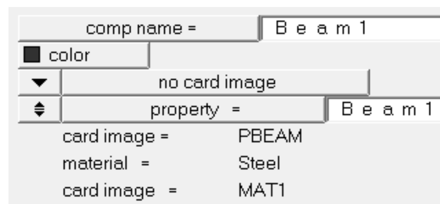


图 2-36　创建 Component

（5）重复步骤（1）～（4）创建 Beam2，beamsection 选择 shell_section.1。

STEP 05 创建 Beam1 的梁单元

（1）在模型树中的 Component 下选择 Beam1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中，

选择 Make Current。

（2）进入 1D 面板 line mesh，设置如图 2-37 所示。

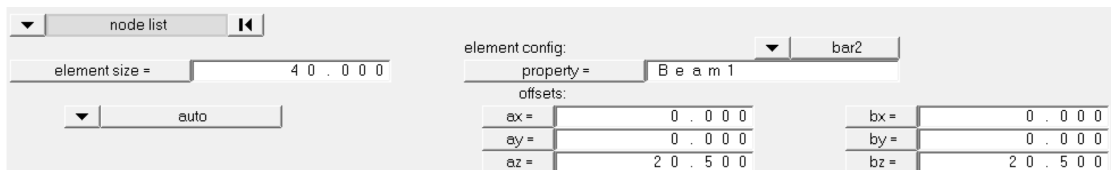


图 2-37　设置梁单元

图 2-37 中的 auto 选项是指定梁单元在全局坐标系下的排列方向。HyperMesh 会根据用户选择的曲线或者节点路径自动确定一个定位方向，并将 HyperBeam 中截面的 *Y* 轴沿此方向排列。这里提供多种指定方向的方法，对于复杂的梁截面以及梁单元坐标系与全局坐标系不正交的情况，比较快的方法是：在 HyperBeam 选择一个点指定 *Y* 轴方向，并在模型中创建一个合适的节点，然后在这里选择这个节点作为方向节点。本例中使用 auto 进行自动定位。

offsets 下的 6 个文本框分别对应梁单元两个节点在全局坐标系下的偏置。这里的 20.5=b−t2/2+T/2，b 和 t2 来自于梁截面的尺寸，T 是此处 2D 网格的厚度。前面说过梁截面剪心位于 t2 中点，而梁单元节点过剪心，而且 2D 网格的节点位于厚度的中点，所以这个计算公式就不言而喻了。

（3）选择如下节点并单击 mesh。

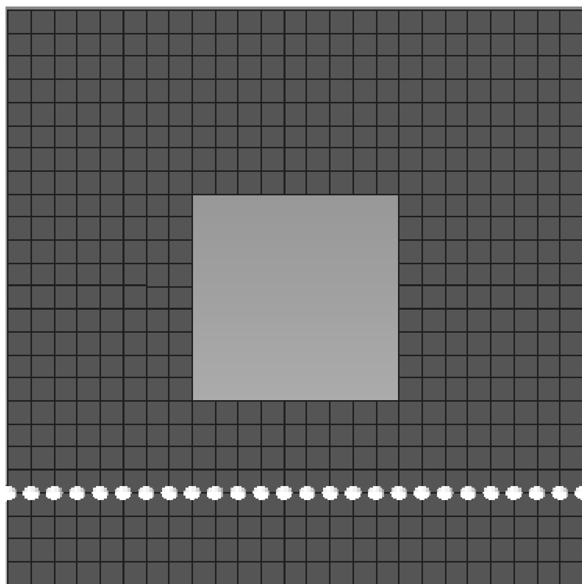


图 2-38　选择节点

通过下面的选项打开 3D 显示，如图 2-39 所示。

观察梁单元和 2D 网格的相对位置是否正确，如图 2-40 所示。

（4）重复步骤（3），总共生成 4 排梁单元，如图 2-41 所示。

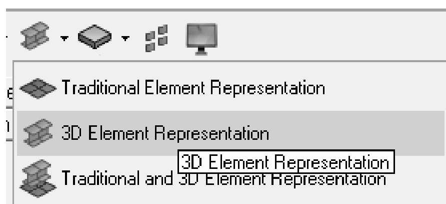


图 2-39　开启 3D 显示

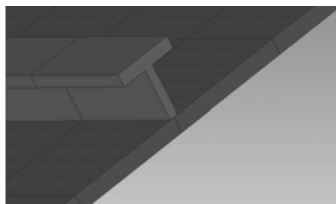


图 2-40　检查梁单元偏置

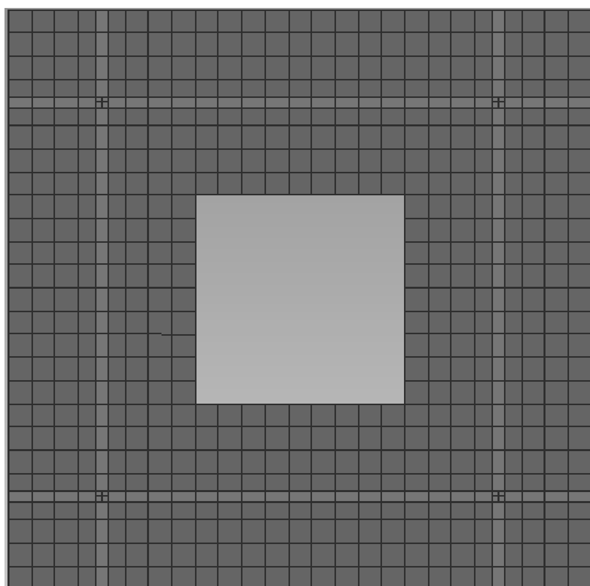


图 2-41　创建梁单元

STEP 06 创建 Beam2 的梁单元

（1）在模型树中的 Component 下选择 Beam2，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Make Current。

（2）进入 1D 面板 line mesh，设置如图 2-42 所示。

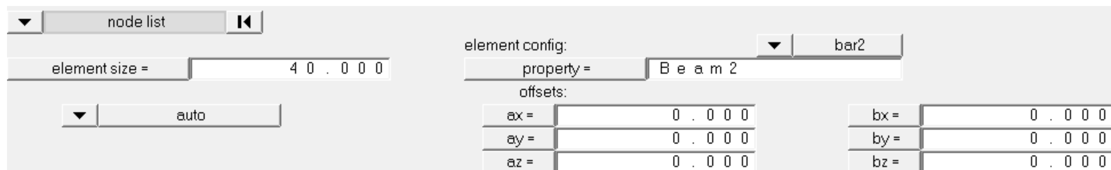


图 2-42　设置梁单元

因为这里即将创建的梁单元坐标系与全局坐标系不正交，所以这里暂不设置偏置。

（3）选择节点 ID=3238 和 3224，并单击 mesh。打开 3D 显示，观察梁单元和 2D 网格的相对位置，如图 2-43 所示。

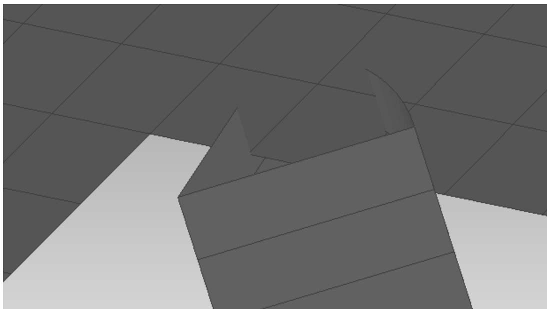


图 2-43　检查梁单元偏置

当前模型是梁截面的剪心（即梁单元的节点位置）与 2D 网格的节点位置重合，但我们需要的是梁截面的形心与 2D 网格的节点位置重合。

STEP 07 创建局部坐标系，并指定 Beam2 的梁单元的偏置

为了方便，要创建一个与梁单元坐标系正交的局部坐标系，然后在这个局部坐标系中设置梁单元的偏置。

（1）进入 1D 面板 systems，选择 create by axis direction 子面板。xy plane 下的选项选择 rectangular。对于 origin、x-axis 和 xy plane 依次输入 ID=3224、3159 和 3205。单击 create 创建一个与 Beam2 的梁单元正交的局部坐标系。

（2）进入 assign 子面板，单击 nodes→by collector→Beam2，单击 system 选择上一步创建的局部坐标系。单击 set displacement 把 Beam2 中的节点赋予给上一步创建的局部坐标系。

（3）进入 1D 面板 bars，选择 update 子面板。输入图 2-44 所示的数据，注意 offset b 上面的选项选择 offsets in displacement，即 offset 的输入数值是相对节点的局部坐标系的。

elem types =		▼	offsets in displacement
offset a:		offset b:	
ax =	0.000	bx =	0.000
ay =	-45.423	by =	-45.423
az =	15.078	bz =	15.078

图 2-44　设置梁单元偏置

图 2-44 中的数据即为此截面的形心相对于剪心的位置数值的相反数。

（4）确认 orientation 下面不为空（虽然不需要更新 oritentation，但这里的值不能为空，任意选择一个方向即可），单击 update，选择 offset at a 和 offset at b，单击 update。

这样梁截面的形心与 2D 网格的节点位置就重合了。

STEP 08 创建约束和载荷

（1）单击 Load Collector 按钮，输入 SPC，选一个颜色，并且 no card image，单击 create。

（2）进入 Analysis 面板 constraints，设置如图 2-45 所示。



图 2-45　创建 SPC

选择 2D 网格 4 个顶点，单击 create。

（3）单击 Load Collector 按钮，输入 Pressure，选一个颜色，并且 no card image，单击 create。

（4）进入 Analysis 面板 pressures，设置如图 2-46 所示。



图 2-46　创建 Pressure

激活 elements，再次单击 elements→by collector→Beam2，单击 create。

STEP 09 创建的载荷工况

（1）从 Analysis 页面进入 load steps 面板。

（2）name =输入 beam_pressure。

（3）type 选择 linear static。

（4）SPC 选择 SPC，LOAD 选择 Pressure，单击 create。

STEP 10 运行 RADIOSS

（1）从 Analysis 页面进入到 RADIOSS 面板。

（2）在 input file 单击 save as。

（3）选择想要写入 RADIOSS 模型的目录，在 File name 中输入模型名字 HyperBeam.fem，单击 Save。

（4）单击 RADIOSS。

STEP 11 查看结果

（1）计算完成之后，单击 HyperView 按钮，打开 HyperView。

（2）在上边的工具栏上单击 Preference→options→visualization，将 BAR 设置为 Cylinder。否则在模型窗口中，梁单元就只能以线显示。

（3）单击工具栏上的 contour 按钮，在 Result type 中选择 Displacement，单击 apply。观察其变形，如图 2−47 所示。

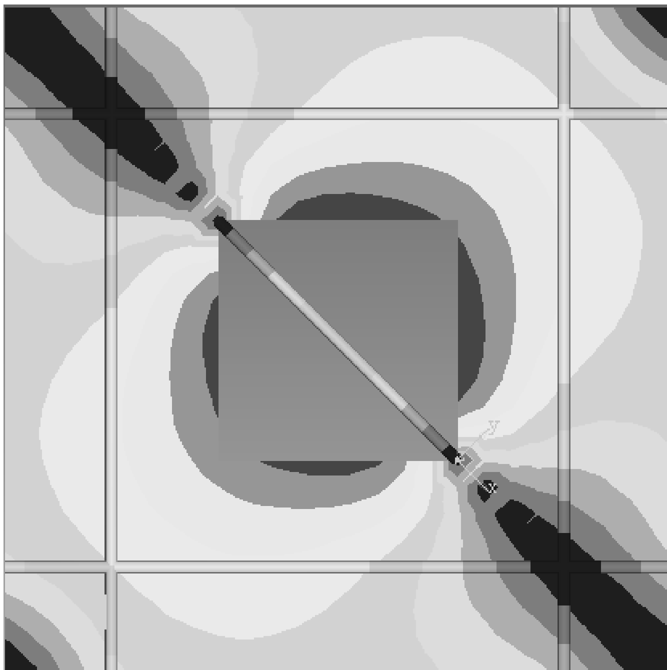


图 2−47　结构变形云图

2.4　接触分析

本节学习如何在 HyperMesh 中创建接触和 gap 单元。

STEP 01　启动 HyperMesh，将用户配置文件设置为 RADIOSSBulk Data

（1）启动 HyperMesh，此时弹出一个 User Profiles 对话框。如果没有弹出，则可从工具栏中的 Preferences 下拉菜单进入。

（2）在 User Profiles 对话框左侧选择 RADIOSS，在右侧的扩展列表中选择 Bulk Data。

STEP 02　单击菜单 File→Open，打开光盘中的 cont_gap_start.hm 文件

文件被导入到当前 HyperMesh 中，模型中已经包含了单元、材料、属性和工况等数据，下面来创建接触和 gap 单元。每一个接触对上有一个 tag 说明希望创建的接触或 gap 类型，上下两个体之间的距离为 0.1。

STEP 03 创建第一个接触（滑动接触）

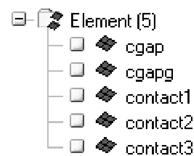


图 2-48 set 浏览器

（1）单击菜单 tools→set browser，可以看到模型中已经创建了 5 个单元集，如图 2-48 所示。

（2）用鼠标右键单击 contact1，选择 isolate，屏幕显示如图 2-49 所示。

（3）在 model browser 中单击 part1 前面的按钮隐藏其网格，显示如图 2-50 所示。

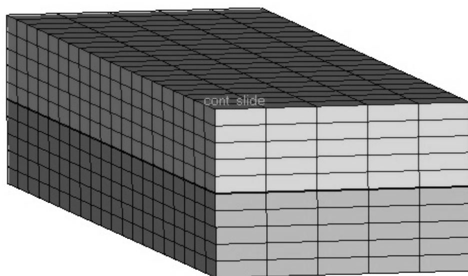


图 2-49 单独显示 contact1

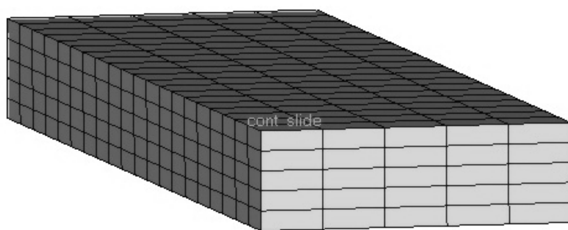


图 2-50 隐藏 part1

（4）单击 analysis→entity sets，设置如图 2-51 所示。

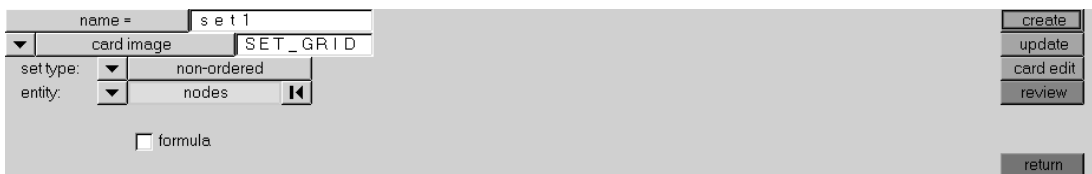


图 2-51 entity set 界面

nodes 选择图 2-52 中的节点（接触面上的节点）。

（5）单击 create 创建节点集合。

（6）在 model browser 中显示 part1，隐藏 part2，如图 2-53 所示。

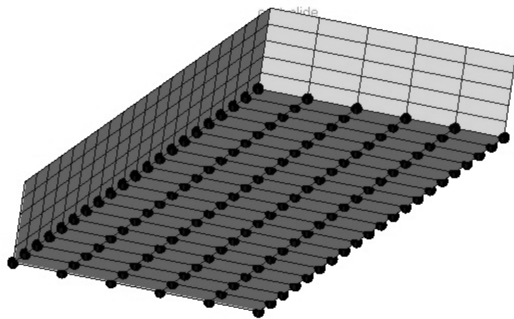


图 2-52 选择节点

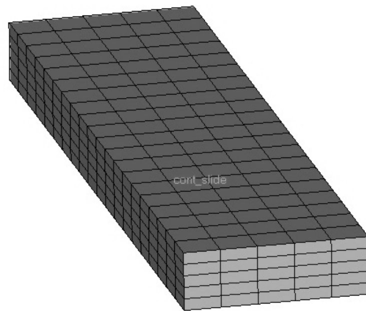


图 2-53 单独显示 part1

（7）单击 analysis→contactsurfs，设置如图 2-54 所示。

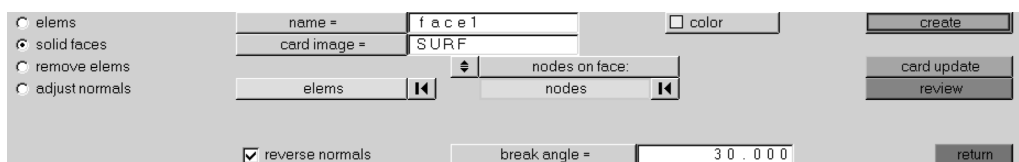


图 2-54　solid faces 界面

elems 选择上图中所有单元，nodes 选择同一单元表面的 3 个节点，如图 2-55 所示。再次单击 nodes，选择 by face，选择结果如图 2-56 所示。

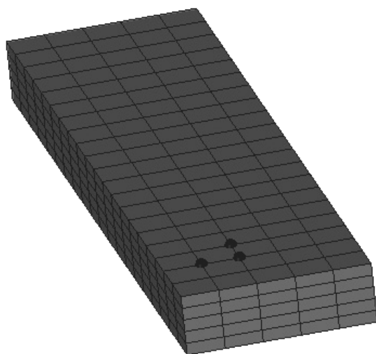


图 2-55　选择上表面同一单元上的 3 个节点

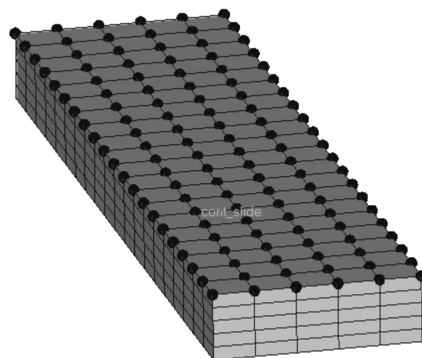


图 2-56　通过 by face 选择上表面所有节点

（8）单击 create 创建 contactsurf，如图 2-57 所示。

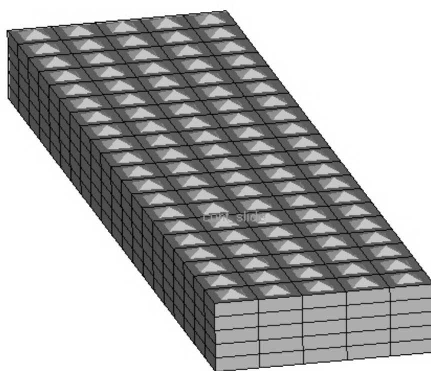


图 2-57　在上表面创建 contactsurf

（9）单击 analysis→interfaces，设置如图 2-58 所示，选中 create 单选按钮。

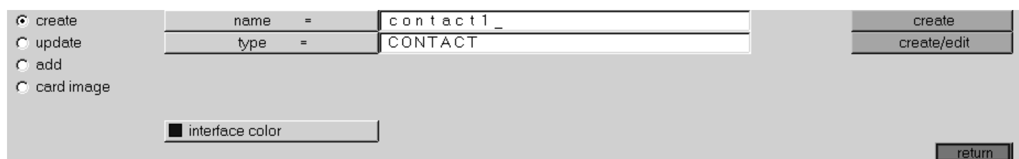


图 2-58　创建 contact1

（10）切换到 add 子面板，在 sets 中选择 set1 并单击右边的 update，csurfs 选择 face1 并单击右边的 update，如图 2-59 所示。



图 2-59　添加 contactsurfs

完成接触的创建后，可以通过单击 review 按钮预览，效果如图 2-60 所示。

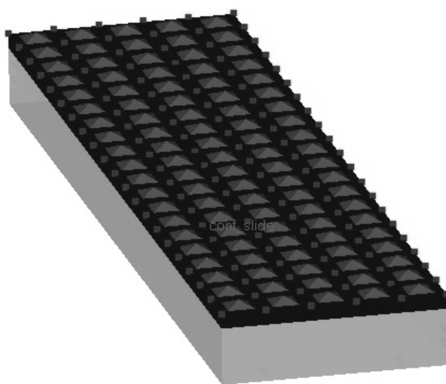


图 2-60　添加 contactsurfs 后的结果

（11）单击工具栏上的属性创建按钮，设置如图 2-61 所示。

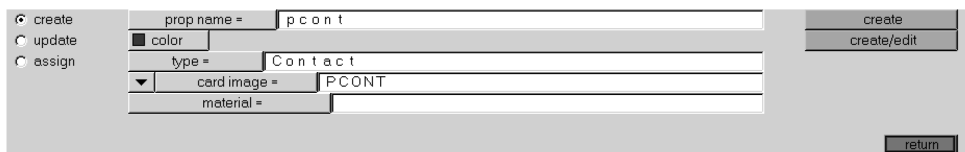


图 2-61　创建 pcont

单击 create/edit，设置如图 2-62 所示，然后单击右下角的 return。

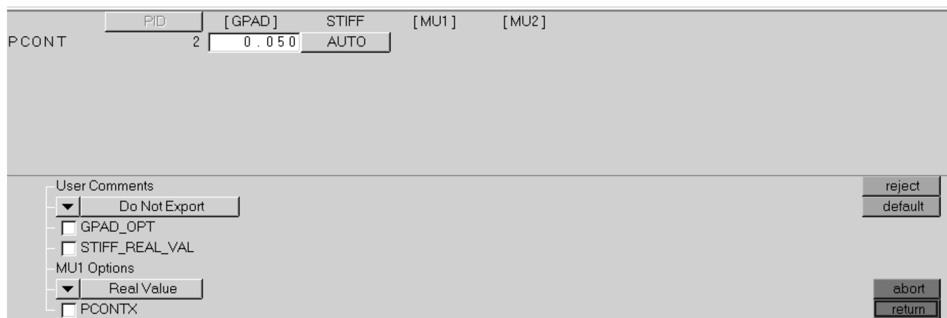


图 2-62　编辑 pcont

卡片的具体含义请参考 PCONT 卡片解释。

（12）在 model browser 中用鼠标右键单击 group 中的 contact1，右键单击选择 card edit，设置如图 2-63 所示。

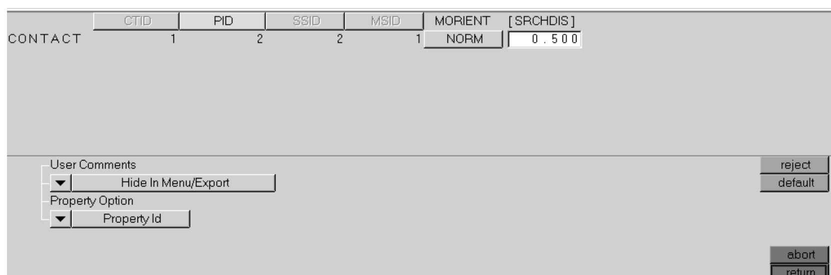


图 2-63　编辑 contact1 卡片

卡片的具体含义请参考 CONTACT 卡片解释。

这样就完成了第一个接触的设置。

STEP 04 创建第二个接触

第二个接触的创建方法与第一个相同，只需将 MU1 设置改为 Stick 即可，如图 2-64 所示。

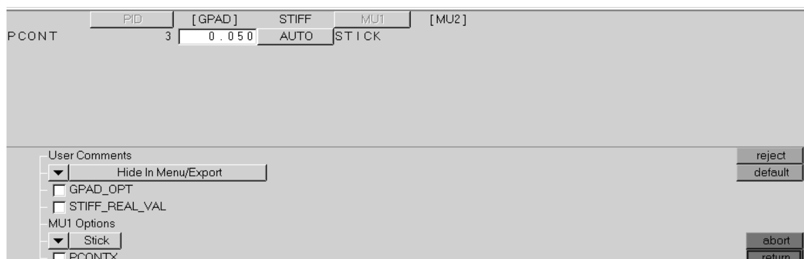


图 2-64　创建第二个 pcont

STEP 05 创建第三个接触

第三个接触的创建方法与第一个相同，只需将 MU1 设置改为 Freeze 即可，如图 2-65 所示。

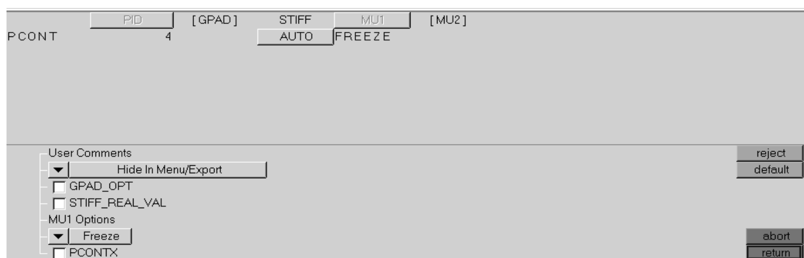


图 2-65　创建第三个 pcont

STEP 06 创建 gap 单元属性

（1）在工具栏上单击属性按钮，设置如图 2-66 所示。

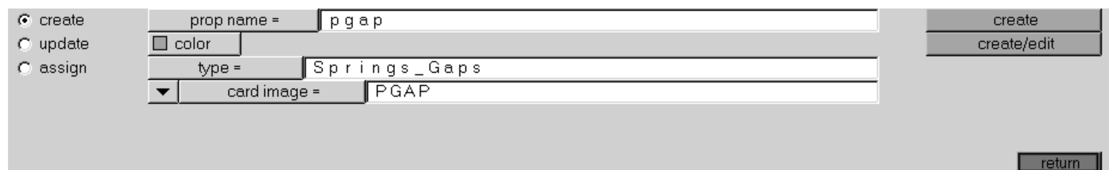


图 2-66　创建 pgap

（2）单击 create/edit，设置如图 2-67 所示。

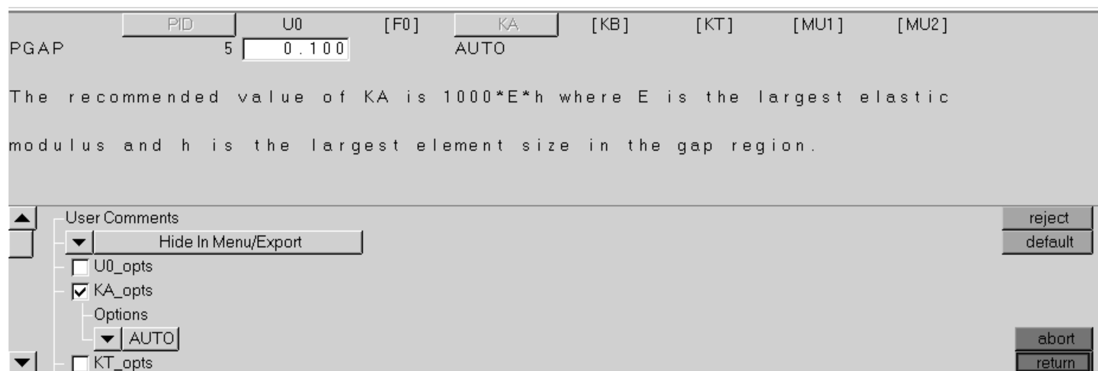


图 2-67　编辑 pgap

STEP 07 创建 cgap 单元

（1）进入 1D 面板 spotweld，设置如图 2-68 所示。



图 2-68　spotweld 界面

在 set browser 中单独显示 cgap，indep nodes 选择 part2 上的接触面节点，如图 2-69 所示。

dep nodes 选择 part1 上的接触面节点，如图 2-70 所示。

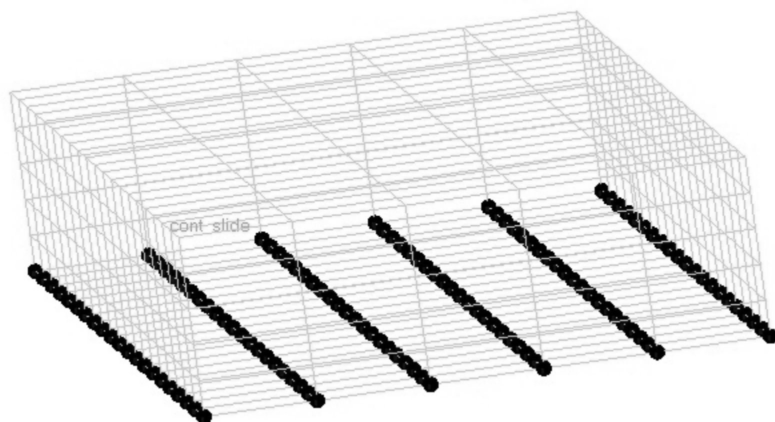


图 2-69　选择 part2 下表面节点

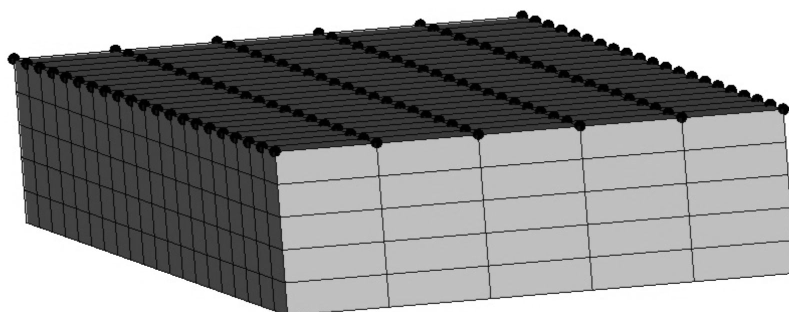


图 2-70　选择 part1 上表面节点

（2）单击 create 就创建了点对点的 cgap 单元（注意当前的 component 为 cgap），这些单元具有 pgap 属性。

STEP 08 创建 cgap(g)单元（点面接触 gap 单元）

（1）进入 1D 面板 gaps，设置如图 2-71 所示。

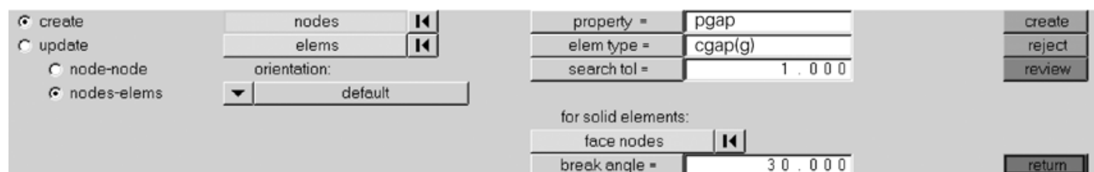


图 2-71　批量创建 cgap(g)单元界面

（2）nodes 选择 part2 的接触节点，如图 2-72 所示。

（3）elems 选择 part1 的单元，face nodes 选择如图 2-73 所示。

（4）单击 create 后创建的 cgap(g)单元如图 2-74 所示。

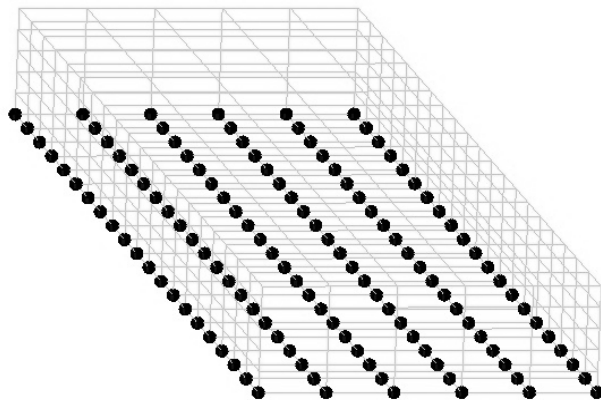


图 2-72　选择 part2 下表面节点

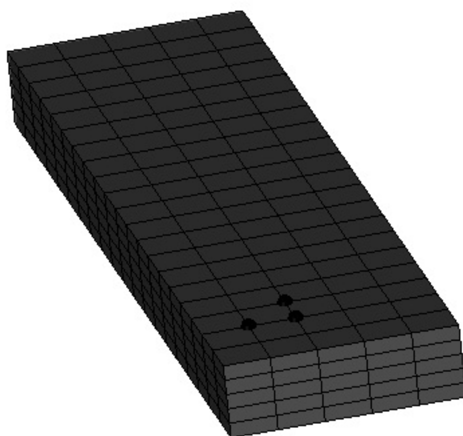


图 2-73　选择 part1 所有单元及上表面的 3 个节点

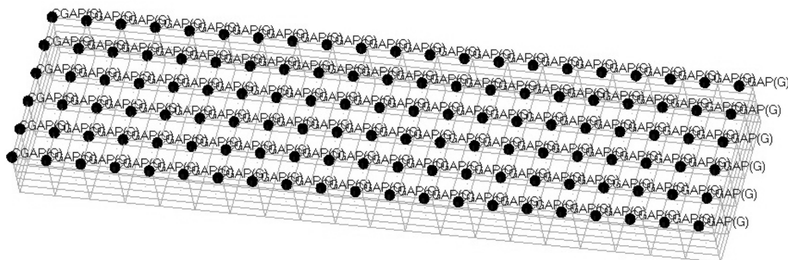


图 2-74　创建的 cgap(g)单元

（5）生成 cgap(g)单元的同时还会生成一维单元 plot 单元，仅用于显示，不参与计算。

说明：如果创建点对点的 cgap 单元，当单元的两个点完全重合时需要为每个 cgap 单元指定一个方向，如指定一个局部坐标系。详细信息可以在 cgap 的卡片中找到。批量创建 cgap 单元时可以使用 HyperMesh 的 spotweld 面板。

STEP 09 提交计算

（1）从 Analysis 进入 RADIOSS 面板。

（2）在 File name 中输入 cont_gap.fem，单击 save。

（3）在 export options 中设置为 all，run options 选择 analysis，memory options 设置为 memory default，单击 RADIOSS 提交求解。

STEP 10 查看工况一的位移结果

位移和应力静态线性分析结果被默认输出，下面将说明如何在 HyperView 中查看这些结果。

（1）单击 Result type 下的第一个下拉菜单，选择 Displacement (v)。

（2）单击 Result type 下的第二个下拉菜单，选择 Mag。

（3）单击 Apply，位移云图如图 2-75 所示。

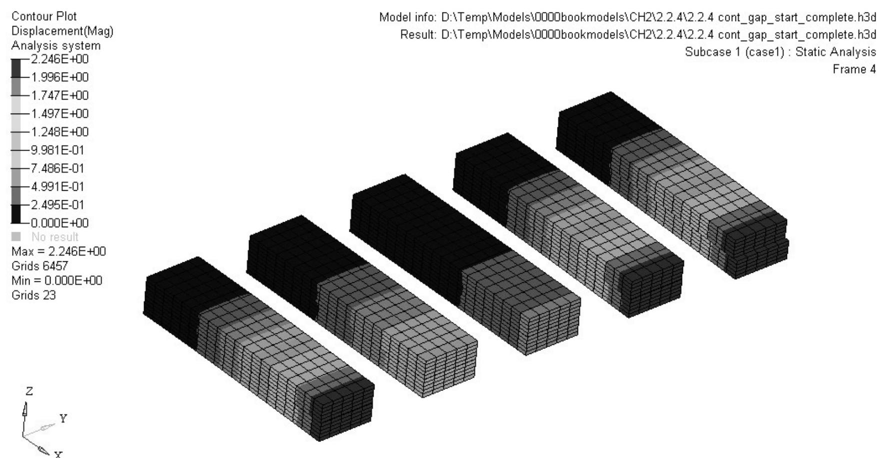


图 2-75　位移云图（一）

STEP 11 查看工况二的位移结果

将图 2-76 中的 Subcase 选项切换为 Subcase2(case2)，如图 2-76 所示。

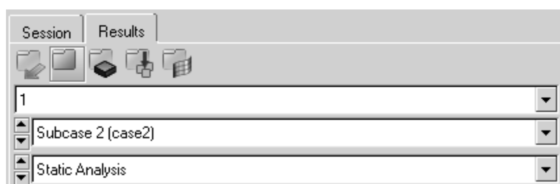


图 2-76　选择工况 Subcase2

位移云图如图 2-77 所示。

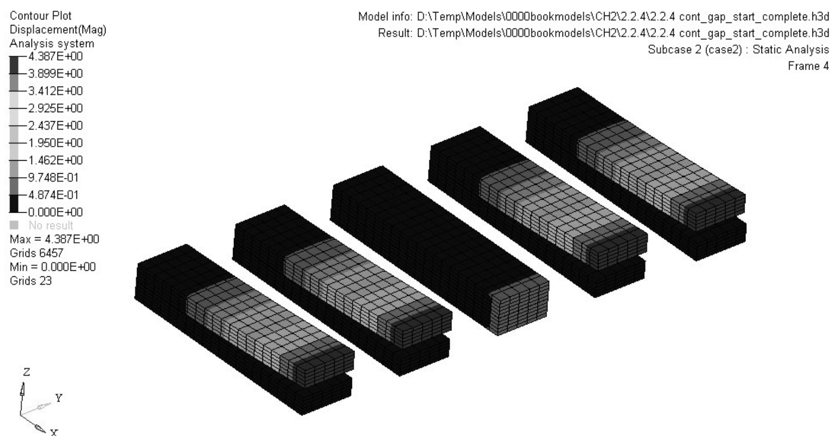


图 2-77　位移云图（二）

可以看到不同 contact 类型的刚度是不同的，cgap、cgap(g)、slide contact 这 3 种类型的作用效果基本相同。

2.3　相关知识

2.3.1　剪切中心的定义及计算方法

剪切中心是指截面上剪应力的合力作用点。

对于薄壁开口截面而言，剪力流的合力形成一扭矩，不仅会使截面发生弯曲，还会使截面发生扭转。如图 2-78 所示，当截面剪力 Q 作用于 B 点时，弯曲发生在主惯性平面（平面内弯曲），必须先将其移到主惯性平面，再通过移轴产生附加力矩，此时必然存在一点使该附加力矩正好与剪力流产生的扭矩平衡。该点就是弯曲中心，又称剪切中心，此时截面只弯不扭。截面的剪切中心是固定的，由截面的几何形状决定，与具体加载方式无关。

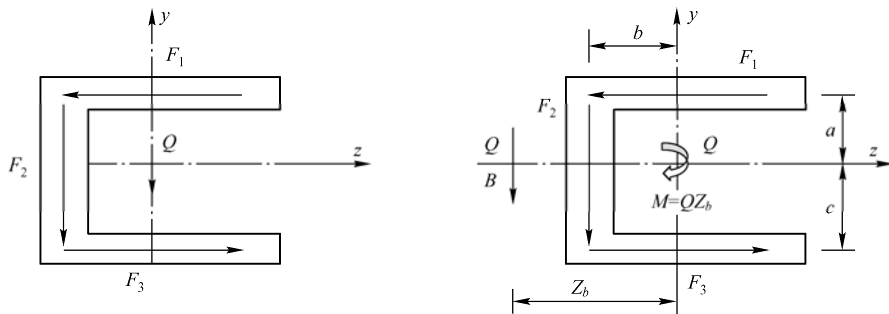


图 2-78　剪切中心载荷分布

如图 2-79 所示，一般情况可以取形心为坐标原点，假设截面上的剪力流 q，根据静力等效条件（无扭转）得到式（2-3）：

$$Q_y X_0 - Q_x Y_0 = \int_0^l \rho \cdot q \mathrm{d}s \tag{2-3}$$

然后分别令 $Q_y = 0$，$Q_x = 0$，得到式（2-4）和（2-5），由此可得到剪切中心：

$$X_0 = \frac{I_y \cdot I_{\omega y} - I_{xy} \cdot I_{\omega x}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \tag{2-4}$$

$$Y_0 = \frac{I_{xy} \cdot I_{\omega y} - I_x \cdot I_{\omega x}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \tag{2-5}$$

其中 $I_{\omega x}$ 和 $I_{\omega y}$ 的定义见式（2-6）和式（2-7）：

$$\begin{cases} I_{\omega x} = \int_0^b \omega x t \mathrm{d}s & (2\text{-}6) \\ I_{\omega y} = \int_0^b \omega y t \mathrm{d}s & (2\text{-}7) \end{cases}$$

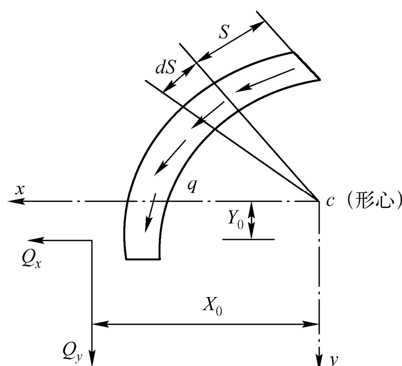


图 2-79　截面剪力分布

在某些较简单的情况下可以直接通过几何作图得到由两个相交矩形组成的截面的剪切中心，如图 2-80 所示。

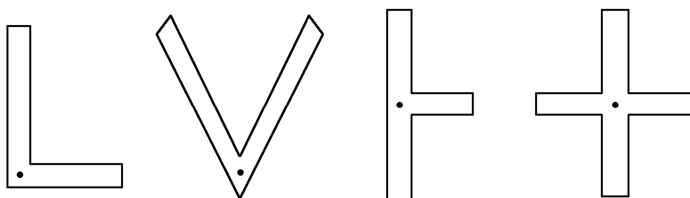


图 2-80　相交矩形组成的截面的剪切中心位置

2.3.2　在 HyperMesh 中为 RADIOSS Bulk Data 施加载荷

1．加载压力载荷

压力载荷有 4 个对应卡片：PLOAD、PLOAD1、PLOAD2 和 PLOAD4。

PLOAD：用于在三角形或四边形单元上定义静压载荷。

PLOAD1：在 CBAR 和 CBEAM 上施加载荷。

PLOAD2：施加在二维结构单元上的压力载荷。该项仅对 QUAD4 或者 TRIA3 单元施加压力载荷。

PLOAD4：结构单元面上的压力载荷，可以在 HEXA、PENTA、TETRA、PYRA、TRIA3、TRIA6 和 QUAD4 或 QUAD8 单元面上定义压力载荷。

实际分析中经常会遇到加载按一定规律分布的压力载荷，下面举例说明。

（1）加载按余弦分布的压力载荷。

如图 2-81 所示，α 表示角度，R 表示半径，L 表示宽度。现知道总压力的合力为 F，要在指定角度为 B、宽度为 L 的圆周区域上施加按余弦分布的压力。

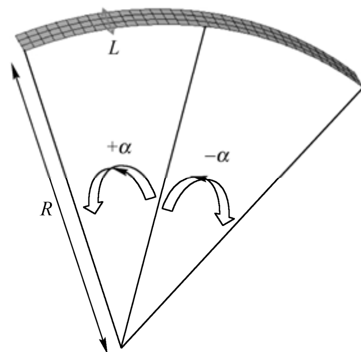


图 2-81　压力加载示意图

压力分布见式（2-8）：

$$P = A\cos\left(\frac{\alpha}{B}\pi\right) \tag{2-8}$$

合力计算见式（2-9）和式（2-10）：

$$F = \int_{-\frac{B}{2}}^{+\frac{B}{2}} A\cos\left(\frac{\alpha}{B}\pi\right)\cos\alpha RL\mathrm{d}\alpha \tag{2-9}$$

$$F = \frac{2\pi B}{\pi^2 - B^2}\cos\frac{B}{2}ARL \tag{2-10}$$

如果 B=π，则可得式（2-11）：

$$F = \frac{\pi ARL}{2} \tag{2-11}$$

由上式求出 A，即可得到压力随角度的分布公式。

如果 B≠π，则可以得到式（2-12）：

$$P = \frac{F\left(\pi^2 - B^2\right)\cos\left(\frac{\alpha}{B}\pi\right)}{2RLB\pi\cos\frac{B}{2}} \tag{2-12}$$

若 F=1000，R=100，L=10，B=π/3，则可以得到式（2-13）：

$$P = \frac{8F\cos(3\alpha)}{3\sqrt{3}RL} = \frac{8\times 1000\times\cos(3\alpha)}{3\sqrt{3}\times 100\times 10} = 1.539\cos(3\alpha) \tag{2-13}$$

在 HyperMesh 中施加上述压力的设置如图 2-82 所示。

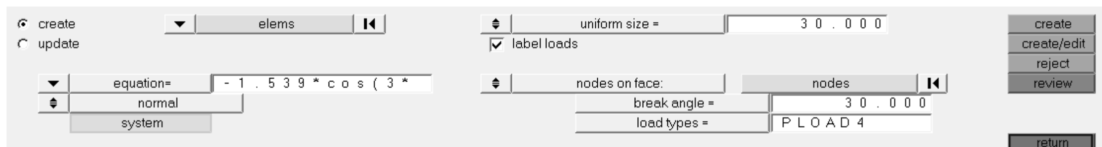


图 2-82　HyperMesh 中施加上述压力的设置

在图 2−82 中，elems 选择需要施加压力的网格，system 选择创建的圆柱坐标系，equation=输入−1.539×cos(3×y)。注意：由于上述合力计算公式中的积分区间是[−*B*/2，+*B*/2]，所以圆柱坐标系的 *X* 轴为圆周网格所对应角的角平分线。圆柱坐标系设置可参照图 2−83。

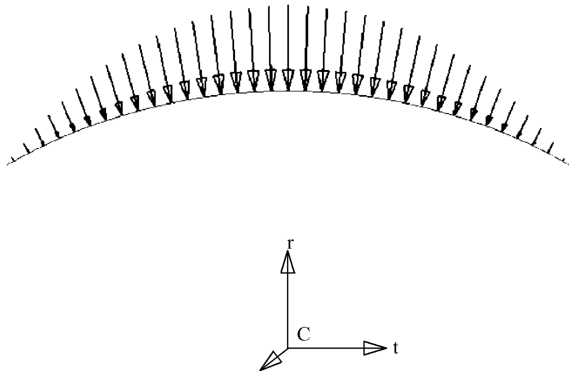


图 2−83　余弦压力载荷

（2）加载水压。

水压见式（2−14）：

$$P = \rho g h \tag{2-14}$$

式中，ρ=1e−9，g=9.8，则 $p = 9.8e^{-9}h$ 。

在 HyperMesh 中施加图 2−84 所示结构的压力的设置，如图 2−85 所示。

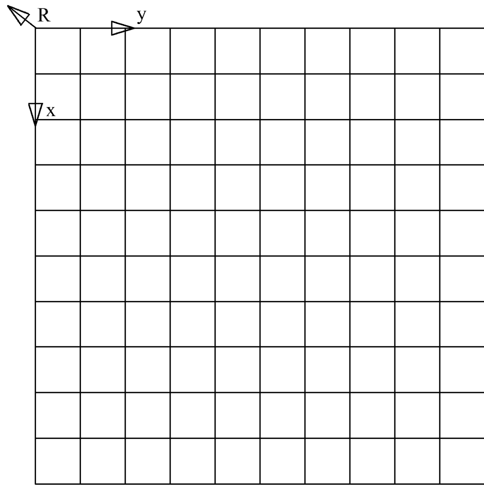


图 2−84　结构示意图

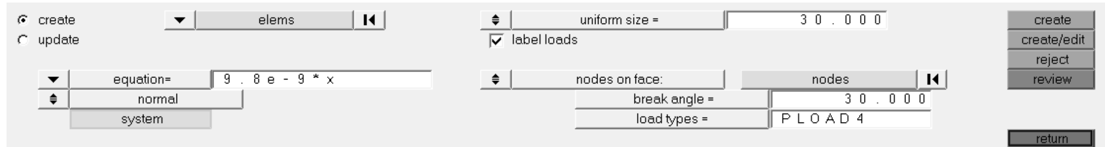


图 2−85　HyperMesh 中施加上述压力的设置

在图 2-85 中，elems 选择需要施加压力的网格，system 选择在水面创建的坐标系，equation= 输入 9.8e19×X。坐标系设置可参照图 2-86。

（3）压力载荷插值。

有时压力载荷（或温度场）来自于外部文件（和分析模型的节点不匹配），这时需要在 HyperMesh 中进行插值。把载荷作用到节点上或者实际载荷为一个场载荷，这时可以通过插值快速创建载荷。HyperMesh 中有线性插值和场插值两种插值方法。

图 2-87 中是需要进行插值的初始载荷，图 2-88 是相应的面板设置。

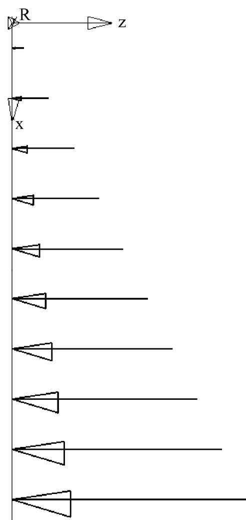


图 2-86　水压载荷

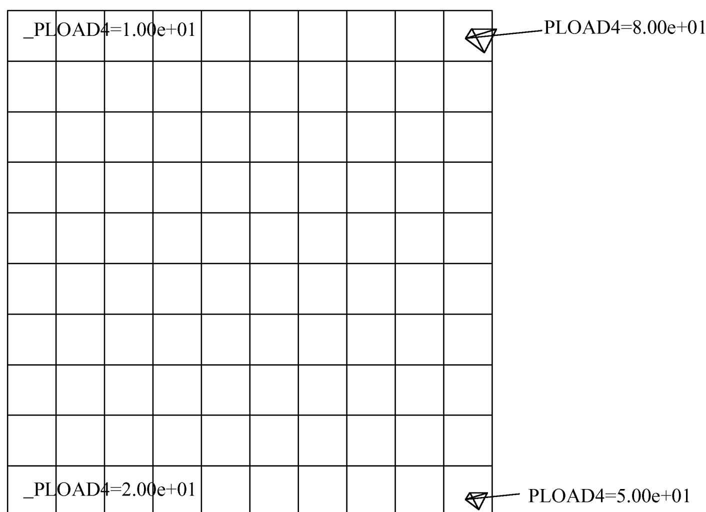


图 2-87　待插值的初始载荷

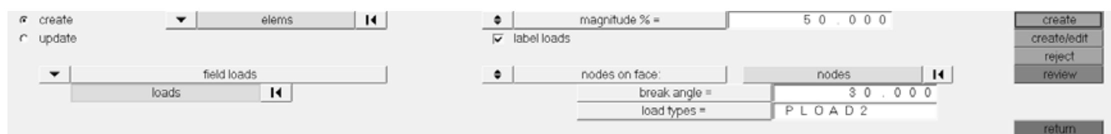


图 2-88　pressure 面板设置

插值得到的结果如图 2-89 所示。

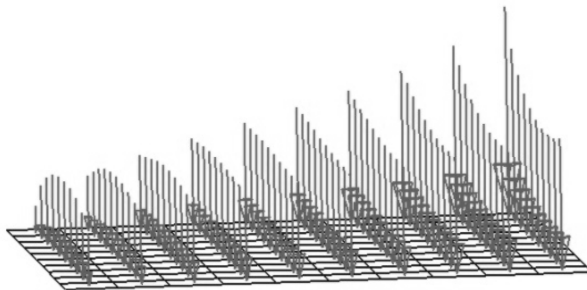


图 2-89　插值结果

与场插值类似的还有线性插值，在线性插值中 HyperMesh 是使用最近的 3 个载荷进行插值，建议插值半径不要超过 3 倍单元长度，否则会出现不准确的结果。

2．加载离心力载荷

RFORCE 卡片格式如表 2-2 所示。

表 2-2　RFORCE 卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
RFORCE	SID	G	CID	A	R1	R2	R3		
	RACC								

离心力载荷通过卡片 RFORCE 实现。

离心力载荷创建方法如下：

（1）新建一个 Load Collector，card image 选择 RFORCE，单击创建并编辑。

（2）指定旋转中心 G。

（3）如有需要，指定一个局部坐标系；如不指定，默认为全局坐标系。

（4）指定转动速度缩放因子 A，单位应该是转/时间，如实际转速为 3000r/min，则这里应该为 50（r/s）。

（5）指定转动方向的分量 R_1、R_2 和 R_3。转动方向根据实际转动方向由右手法则确定。

（6）如果需要考虑旋转加速度，则在 RACC 项进行相应的设置。

注意：施加离心力载荷的零件需要赋予密度。

3．加载重力

GRAV 卡片格式如表 2-3 所示。

表 2-3　GRAV 卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
GRAV	SID	CID	G	N1	N2	N3			

重力载荷通过卡片 GRAV 实现。

加载重力创建方法如下：

（1）新建一个 Load Collector，card image 选择 GRAV，单击创建并编辑。

（2）如有需要，指定一个局部坐标系；如不指定，默认为全局坐标系。

（3）指定重力大小缩放因子 G。

（4）指定重力方向的 3 个分量 N_1，N_2 和 N_3。

注意：施加重力载荷的零件需要赋予密度。另外，重力载荷不能只施加在局部模型，只能对整体施加。

2.4　本章小结

本章介绍了工程中最常用的求解序列——线性静力分析。虽然是最基本的分析类型之

一，但是在网格处理、零件连接和载荷工况的创建等方面也有很多较为繁琐的工作。需要用户在工作过程中不断地积累经验，在本章的最后对较复杂的几种加载进行了讨论。此外，还讨论了梁截面的剪切中心的概念和计算方法，通常一些常用的梁截面，如圆形截面、矩形截面等对称形状的剪切中心和几何形心是一致的，这时梁单元的建模不需要对剪切中心做特别的考虑。但是如果是 T 形截面、C 形截面或者一些用户自定义的不规则截面，由于 HyperMesh 默认把梁单元建立在剪切中心，这时为了保证有限元模型和实际模型的一致性就要计算剪心，该过程手工计算较困难，可以在 HyperBeam 中自动得到。

第 3 章



非线性静力分析

第 2 章中介绍的线性分析只是真实物理现象的某种近似。幸运的是使用这种近似不仅在很多情况下可以达到工程上需要的计算精度，而且还能以一种更简单的数学形式将结构的物理本质表达出来，但是这种近似并不是任何情况都适用。当分析对象出现大变形或大转动，材料发生塑形变形或者在分析过程中接触状态会发生变化等情况下使用线性分析进行简化分析就无法得到精确结果，这时必须考虑模型的非线性进行分析。非线性根据其来源不同可以分为几何非线性、材料非线性和状态非线性三大类。

本章重点知识

3.1　非线性静力分析基本理论
3.2　非线性分析实例
3.3　本章小结

3.1 非线性静力分析基本理论

3.1.1 非线性准静态 GAP 和接触分析介绍

非线性准静态分析中非线性的来源包括接触和 GAP 单元。MATS1 弹塑性材料引起的非线性在后面讨论。

非线性准静态分析和线性静态分析类似，在求解非线性问题时也使用小变形理论。惯性释放分析对非线性分析同样有效。基于小变形理论，应变始终在线弹性范围（约 5%应变），转动在小转动范围（约 5°转角）。因此，接触和 GAP 单元的位置和方向不会随着变形而更新，它们在整个非线性计算过程保持不变，但单元的方向会随着优化运行导致的几何变化而变化。

3.1.2 非线性求解方法

求解非线性问题使用牛顿法，该方法的基本原理通过下面的一维问题进行解释，如图 3−1 所示。

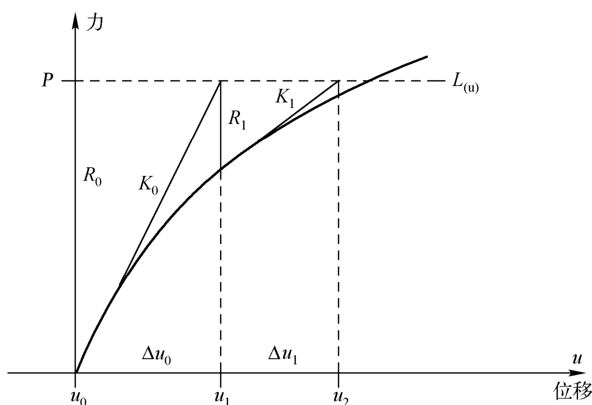


图 3−1

考虑一个非线性问题：

$$L(u) = P \quad (3-1)$$

式中，u 是位移矢量，P 是全局载荷矢量，$L(u)$是系统的非线性响应（节点反力）。对于线性问题，$L(u)$可以简化为 Ku（见线性静态分析部分）。对该方程应用牛顿法可以得到如下的迭代求解过程：

$$K_n \Delta u_n = R_n \quad (3-2)$$

$$U_{n+1} = u_n + \Delta u_n \quad (3-3)$$

其中在 U_n 点：

$$K_n = \frac{\partial L(U)}{\partial u} \tag{3-4}$$

$$R_n = P\big|L(U_n) \tag{3-5}$$

在式（3–4）中 K_n 代表一个“斜率”矩阵，定义 $L(u)$曲线在点 u_n 的切线。R_n 是非线性残差，计算方法见式（3–5）。在适当的收敛准则下不断重复该过程可以实现 R_n 系统性的减小从而使计算收敛。

以上方法可以被修改成式（3–6）的等价形式，不直接计算Δu 而是直接计算得到u_{n+1}：

$$K_n u_{n+1} = R_n + K_n u_n \tag{3-6}$$

这种方法是直接通过在牛顿方程的两边加上$K_n u_n$得到的，在实际操作中有一定的优势。

3.1.3 增量加载

对于很多满足一定稳定性和平稳性条件下的问题，如果最初的假设能够最大限度地接近真实结构的力–位移路径 $L(u)$，牛顿迭代方法被证明是收敛的。因此，为了提高非线性问题的收敛性，总加载 P 总是通过一些小的增量加载上去，如图 3–2 所示。在每一个中间载荷 P_1、P_2、…都需要进行牛顿法标准迭代。

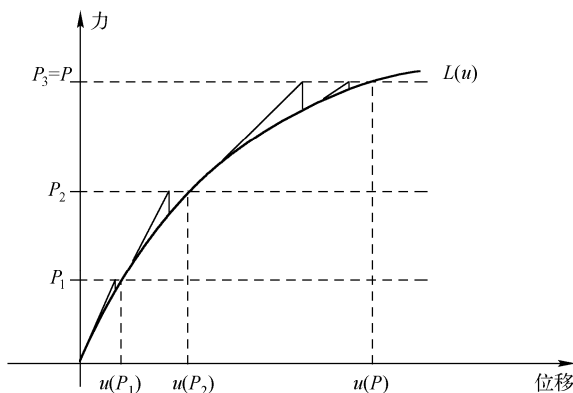


图 3–2　增量加载

增量加载有助于保证连续迭代更加接近于实际加载路径，从而提高最终得到收敛结果的概率（虽然会造成迭代次数的增加）。RADIODD Bulk Data 中载荷增量默认按 10 次施加，某些非线性分析出现收敛困难时可以考虑适当增加该值。

3.1.4 非线性收敛性判别准则

为了判断非线性过程是否收敛，有很多收敛性判别标准可供选择。这些准则和各自的公差可以在 Bulk Data 中的NLPARM卡片中选择。最基本的准则就是通过比较结果误差和公差

的大小来决定。如果误差小于公差就认为是收敛的。在多种准则存在的情况下，必须满足所有的收敛准则结果才是收敛的。

位移的相对误差（收敛汇总中的 EUI）通过式（3−7）进行计算：

$$E_u = \frac{q}{1-q}\frac{\|A \cdot \Delta u\|}{A \cdot u} \tag{3−7}$$

这里 A 是一个归一化的向量，它包含了刚度矩阵 $K(A_i = \sqrt{K_{ii}})$ 对角线元素的平方根，矢量的模可以由式（3−8）进行计算：

$$\|A \cdot u\| = \sum_i |A_i u_i| \tag{3−8}$$

另外，q 是一个收缩因子，用来校正增量Δu_n，从而在非线性求解中更好地计算出真实误差，如式（3−9）：

$$q = \frac{\|\Delta u_n\|}{\Delta u_{n-1}} \tag{3−9}$$

为了使 q 在实际计算中具有更好的稳定性，通过式（3−10）每个迭代步进行更新：

$$q_n = \frac{2}{3}\frac{\|\Delta u_n\|}{\Delta u_{n-1}} + \frac{1}{3}q_{n-1} \tag{3−10}$$

给定一个初始值 q_1= 0.99。注意，当结果接近收敛时，收缩因子是有意义的，它将合理地估计出在非线性求解中的实际误差。

以载荷衡量的相对误差（收敛汇总中的 EPI）可以测量出残余 R 的相对强度，计算如式（3−11）：

$$E_P = \frac{\|R \cdot u\|}{\|P \cdot u\|} \tag{3−11}$$

式（3−11）中的载荷向量 P 包含给定位移下节点反力。

以功衡量的相对误差（收敛汇总中的 EWI）反映出计算中能量的相对变化，计算如式（3−12）：

$$E_w = \frac{\|R \cdot \Delta u\|}{\|P \cdot u\|} \tag{3−12}$$

注意，上面的准则只是计算非线性迭代的误差。这些数据并不代表有限元结果的准确性，仅仅说明了整个非线性分析是收敛的。换句话说，这只是说明矩阵方程的求解是正确的，如果方程本身和物理实际不一致那么这时计算的结果就是错误的。

3.1.5 非线性问题设置

非线性求解的设置是非常直接的，静态载荷和边界条件是在输入文件中的 Bulk Data 段设置的。它们需要被 SUBCASE 段的SPC和LOAD申明引用。每一个 SUBCASE 定义一个载荷向量。

不受约束或约束不足的模型可以用惯性释放求解。惯性释放可以使用 SUBCASE 段的 SUPORT1 引用约束刚体移动的虚拟边界条件。最多可以约束 6 个自由度。这些约束也可以

通过 PARAM，INREL，−2 让软件自动生成。

SUBCASE 段的NLPARM用于指定该分析是非线性分析，SUBCASE 段的NLPARM需要引用 Bulk Data 段的NLPARM卡片（该卡片包含收敛设置和其他非线性相关设置）。

例子：

```
SUBCASE 10              定义一个工况
SPC = 1                 引用工况中的约束
LOAD = 2                引用工况中的载荷
NLPARM = 99             引用非线性分析参数
BEGIN BULK
NLPARM 99               定义非线性分析参数
UPW+1.1e-5
```

注意， 非线性 GAP 单元和接触在优化中同样适用。

3.1.6 非线性收敛注意事项

牛顿法是非线性求解的一种可靠工具，可以提供快速的二次速率收敛，但是这种收敛不是在任何情况下都可以得到保证的，接触问题尤其是有摩擦的情况下会导致收敛困难。

为了提高计算收敛性，系统内置了一些方法解决收敛问题，如振荡形式的不收敛问题。其中一种方法是使用粘性间隙，引入残余粘性防止那些“不确定”点时而进入接触时而退出接触。另一种方法是使用间隙/接触状况冻结，在一定数量的迭代振荡后不允许间隙/接触单元改变打开/关闭状态。注意，这些方法只对接近收敛的问题有用，而不涉及收敛或者发散问题。

非线性收敛用户注意事项如下：

1．根据实际进行问题设置

确保这个非线性问题代表的是一个有解的实际物理情景，注意要为 GAP 单元选择合适的定位方向。

2．被分析的结构有足够的支撑

由于 GAP 单元和接触单元仅提供单向支撑，因此在这种方法下个别组件在一定的载荷条件下就会有刚体自由度。这时求解过程就会出现零主元。出现零主元一般是模型中出现了过约束或者是约束不够。有限元软件求解刚度矩阵一般使用高斯消元。对于高斯消元的基本求解方法是先对矩阵进行正向消元，再反向迭代求解。矩阵中每行的第一个非零的系数就是主元。零主元是指在高斯消元后的刚度矩阵中出现了全为零的一行。过构束相当于用 10 个方程去解 9 个未知数。约束不够相当于某一行有力，但没有与之对应刚度项。为了避免这种状况建议对所有组件提供恰当充分的支撑，这样即使没有 GAP 单元或者接触单元也不会存在刚体模式。如果“实体”支持不是对所有的部分都可行，则可以用一个很微弱的弹簧防止当 GAP 单元或者接触单元不存在时组件“飞走”。这种辅助弹簧的刚度选择要考虑到防止零件的大位移运动，并且要与模型的尺寸大小相适应。如果 GAP 单元和接触界面能够合理设置，当结果收敛时，这种弱弹簧实质上对结果没有影响。

3．合理的 GAP 单元刚度

GAP 单元刚度值 KA 和 KT 本质上是代表了罚刚度，需要取足够大的值以防止可能的接触节点穿透。刚度值越高，越能更准确地模拟接触条件，但是过高的刚度值可能会引起收敛困难或者引起刚度矩阵病态（尤其是 KT）。如果发现这种状况可以考虑降低 GAP 单元刚度值。建议合理的刚度值的数量级范围是$(10^3\sim10^6)Eh$

E 是典型的弹性模量，h 为 GAP 单元旁边区域典型的单元大小。这种设置可以保持间隙的穿透在单元大小的万分之一～千分之一。KT 合理的量级是 0.1KA

为了得到 KA 和 KT 更合理的数值，RADIOSS 和 OptiStruct 都支持这些参数的自动计算：

选项 KA=AUTO 通过周围单元的刚度确定 GAP 单元的刚度，选项 SOFT 和 HARD 可以分别创建更小或者更大的罚函数。SOFT 应用于收敛困难的情况下，HARD 应用在求解过程中发现了不希望的穿透的情况。

选项 KT=AUTO 自动计算出 KT 的值。如果 MU1>0，和 KT 空白时的结果是一样的，则它的数值计算为 MU1×KA。如果 MU1=0 或者空白，则 KT=AUTO 可以为 KT 创建一个非零刚度值，计算结果为 KT=0.1KA。所以，KT=AUTO 可以用来创建强制粘贴的情况。

4．摩擦力

由于它的非线性和非保守力的性质，摩擦力的存在可能引起非线性收敛困难，尤其是存在滑动时。因此，某些情况下可以先不考虑摩擦力，使原本不收敛的问题变成收敛。当摩擦阻力存在是必须的，并且预期滑动值较小时，可以尝试使用强制粘贴，强制粘贴比库仑摩擦有更好的收敛性（具体细节查看PGAP和PCONT数据卡片）。注意，如果在较大的滑移运动中，则强制粘贴可能因为进入翻滚模式而不收敛。RADIOSS12.0 对摩擦接触的收敛性有了很大的改进。

5．间隙偏置

为了提供理论上的正确性，摩擦力在间隙/接触单元的非零长度的 GAP 单元处产生弯矩（弯矩产生的原因是摩擦力由接触面偏移到节点位置），这种偏置操作可能引起收敛问题和有悖常理的结果。在摩擦力问题上，明智的办法是通过下面的参数关掉偏置操作。

GAPPRM,GAPOFFS,NO

这样可以在有摩擦力的情况下产生更直观的结果。然而，这样可能造成刚体的不平衡，因此使用时要慎重，尤其是结构没有被完全约束的问题。

6．增量加载

如果已经采取了以上措施非线性过程还是不收敛，则采用增量加载（通过很多增量把整个载荷施加上去）可以促进收敛。具体细节查看NLPARM卡的描述。如果是因为问题设定不正确造成的（结果存在过渡变形、刚体位移、刚度矩阵病态、非常高的非线性误差等），那么增量加载也不能提供收敛解决方案。

7．非线性专家系统

在一些收敛困难的情况下，运用专家系统可以促进收敛：

PARAM,EXPERTNL,YES

专家系统可以尝试着调整载荷增量和其他的非线性参数来达到收敛。需要注意的是，如果是因为问题设定不正确造成的（结果存在过渡变形、刚体位移、刚度矩阵病态、非常高的非线性误差等），那么专家系统也不能提供收敛解决方案。

在某些情况下，可能计算了很长时间依然不能结束。这可能主要是因为载荷增量太小或者是运用修改后的非线性参数重新计算造成的。

3.1.7 非线性分析工况定义示例

1．隐式（准）静态分析示例

```
SUBCASE 1
ANALYSIS = NLGEOM
SPC = 1
NLOAD = 2
NLPARM = 3
TTERM = 1.0
DISP = ALL
STRESS = ALL
BEGIN BULK
NLPARM,3
NLOAD1,2,2,,L,88
TABLED1,88,
+,0.0,0.0,1.0,1.0,ENDT
DTI,UNITS,1,kg,N,m,s
```

几何非线性分析需要定义单位系统，可以使用 control cards 中的 DTI 卡片定义。几何非线性分析需要使用 Nload 进行载荷的定义。在 HyperMesh 中可以通过 loadstep 的 update 将非线性准静态分析转换为几何大变形分析。

2．隐式（准）静态分析替代形式示例

```
SUBCASE 1
ANALYSIS = NLGEOM
SPC = 1
LOAD = 4
NLPARM = 3
DISP = ALL
STRESS = ALL
BEGIN BULK
NLPARM,3
FORCE,4,233,,1.0,0.0,0.0,1.0
DTI,UNITS,1,kg,N,m,s
```

3．隐式动态分析示例

```
SUBCASE 2
ANALYSIS = IMPDYN
SPC = 1
IC = 5
TSTEPNL = 3
TTERM = 0.2
DISP = ALL
STRESS = ALL
BEGIN BULK
TSTEPNL,3
TIC,5,123,1,,13.88
DTI,UNITS,1,kg,N,m,s
```

4．显式分析示例

```
SUBCASE     3
ANALYSIS = EXPDYN
SPC = 1
NLOAD = 2
XSTEP = 3
TTERM = 1.0
DISP = ALL
STRESS = ALL
BEGIN BULK
XSTEP,3
NLOAD1,2,2,,L,88
TABLED1,88,
+,0.0,0.0,1.0,1.0,ENDT
DTI,UNITS,1,kg,N,m,s
```

5．连续工况示例

```
DISP = ALL
STRESS = ALL
SUBCASE 1
ANALYSIS = NLGEOM
SPC = 1
NLOAD = 2
NLPARM = 3
TTERM = 1.0
SUBCASE 2
```

```
ANALYSIS = EXPDYN
IC = 5
XSTEP = 4
TTERM = 1.1
CNTNLSUB = 1
BEGIN BULK
NLPARM,3
XSTEP,4
NLOAD1,2,2,,L,88
GRAV,2,,9.81,0.0,0.0,1.0
TABLED1,88,
+,0.0,0.0,1.0,1.0ENDT
TIC,5,123,1,,13.88
DTI,UNITS,1,kg,N,m,s
```

6．隐式（准）静态连续工况分析替代形式示例

```
DISP = ALL
STRESS = ALL
ANALYSIS = NLGEOM
CNTNLSUB，YES
SUBCASE 1
SPC = 1
LOAD = 2
NLPARM = 3
SUBCASE 2
SPC = 1
LOAD = 4
NLPARM = 3
BEGIN BULK
NLPARM,3
GRAV,2,,9.81,0.0,0.0,1.0
FORCE,4,233,,1.0,0.0,0.0,1.0
UNITS = SI
```

3.1.8 用户注意事项

1．几何非线性分析属性和材料

几何非线性分析具有专门的单元类型和非线性材料。一般情况下，仅适用于几何非线性分析的属性和材料的定义可以分别从原始属性和 MAT1 材料扩展得到。这种扩展

通过共用 PID 和 MID 与原材料属性归为一组。在不是几何非线性分析的工况中这些扩展被忽略。也可以为 shells (XSHLPRM)和 solids (XSOLPRM) 设置属性默认值来取代属性扩展。

属性示例：

PSHELL, 3, 7, 1.0, 7, , 7

PSHELLX, 3, 24, , , 5

材料示例:

MAT1, 102, 60.4, , 0.33, 2.70e-6

MATX02, 102, 0.09026, 0.22313, 0.3746, 100.0, 0.175

2．坐标系统

在几何非线性分析中有移动坐标系和固定坐标系。通过网格点（CORD1R，CORD3R）定义的直角坐标系会随着模型的变形而移动。通过点坐标（CORD2R，CORD4R）定义的坐标系是固定的。

载荷的行为取决于参考坐标系。如果载荷FORCE、MOMENT被定义为随动载荷，那么必须定义一个参考移动坐标系（CORD1R，CORD3R）的 CID；否则这些载荷不会跟随变形。PLOAD总是跟随变形。

3.1.9 几何线性分析和几何非线性分析的区别

在几何线性分析中，所有的变形和转动都非常小。作为一般的尺度，5%以内的位移变形和 5°以下的转动可以被看成是小变形，转动的影响很小。一个转动的体即使被定义为刚性，在变形下的线性特性也更显著。非线性只来自于接触和材料。这类分析在非线性准静态分析中可以通过定义 ANALYSIS = NLSTAT 支持。载荷在未变形的坐标系中只能沿着定义好的轴移动。

在几何非线性分析中，位移和转动都很大（有限值）。力的大小实际上对收敛是有影响的。载荷大小的改变可以很明显地改变收敛性。同样，力的方向也需要控制。力的方向可以跟随变形或者保持它们原来的方向。这些可以通过选择不同的坐标系进行控制。

图 3-3 显示了一个具有小位移的悬臂梁，具有随从力的大位移和没有随从力的大位移。图 3-4 显示的是一个具有小的、有限的转动角度 θ 的简单刚性转动。

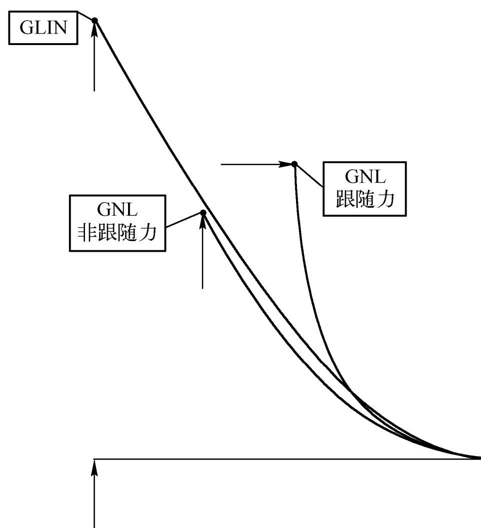


图 3-3　小位移（GLIN）和大位移（GNL）的悬臂梁变形

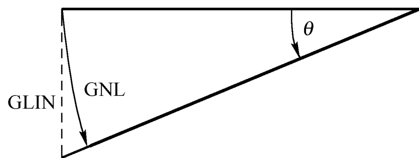


图 3–4　小转动（GLIN）和有限转动（GNL）

3.1.10 隐式分析和显式分析的区别

隐式静态分析有以下特点：

（1）包含矩阵分解。

（2）刚度矩阵必须是正定矩阵。

（3）模型必须充分约束。

（4）没有未连接的部分。

（5）为了达到平衡需要进行迭代。

（6）平衡在迭代容差内达到。

（7）大时间步长。

（8）稳态的（准）静态过程。

隐式动态分析有以下特点：

（1）包含矩阵分解。

（2）刚度矩阵必须是正定矩阵。

（3）为了达到平衡需要进行迭代。

（4）平衡在迭代公差内达到。

（5）大时间步长。

（6）稳态过程。

显式（动态）分析有以下特点：

（1）通常使用对角质量矩阵。

（2）不需要矩阵分解。

（3）平衡总是可以保证。

（4）需要根据最大稳定时间步长进行计算。

（5）时间步长较小。

（6）瞬态过程。

1．隐式接触

在隐式接触分析中，用户需要注意以下两点。

（1）在网格中应该没有初始穿透。有时为了使分析顺利开始初始穿透是必要的。推荐使用较小的穿透（< 0.01GAP），这样不至于和实际情况出入太大。大的初始穿透虽然可以使求解继续，但是可能导致不正确的结果。用户在运行检 check run 时将得到关于初始穿透的警告。

（2）在准静态分析中，模型需要充分约束。例如，有两个方块（见图 3-5），上面的一个没有被约束，建议定义一个很小的 GAP 使两个块完全分开。这就创建了在垂直方向上约束上面的物块的小弹簧。当然，刚体部分的其他运动也必须被约束。

更加详细的信息可以在CONTACT、CONTPRM和PCONTX数据定义中找到。

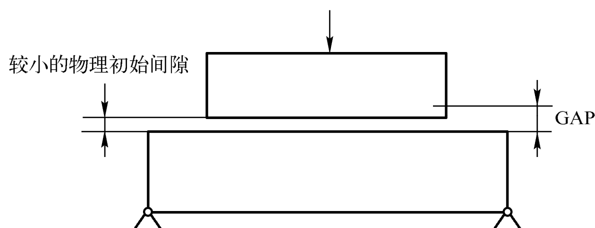


图 3-5　GAP 示例

2．隐式状态跳跃（Snap-thru）和后屈曲分析

一些具有很大变形的非线性问题会遇到分叉。这时求解会变得不稳定，并且结构会从一个状态跳跃到另一个状态（见图 3-6）。载荷不是简单的随着位移的增加而增大，甚至可能会减小，直到达到稳定点，然后会持续增长（见图 3-7）。在隐式求解过程中，一个简单的载荷增量很难判断出力开始减小的点在哪里。

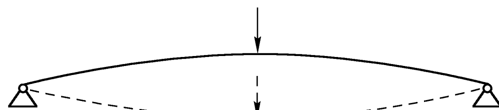


图 3-6　状态跳跃

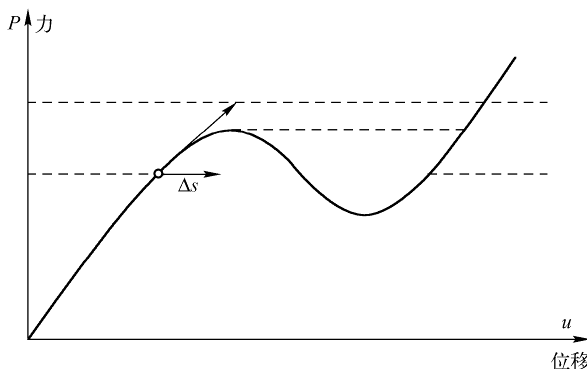


图 3-7　状态跳跃-载荷与位移

可以使用一种特殊的方法找出合适的搜索方向Δs使求解保持在自己的路径上，这种方法叫 Riks 方法，可以通过 NLPARMX，SACC 定义。搜索方向通过满足特定的约束定义 。两种约束方法可以通过 NLPARMX 和 CTYP 选择。

目前，这种方法的结果的表达有一些限制，如内力无法绘制。

在隐式静态分析中非充分约束的模型，可以用惯性刚度来克服刚度矩阵奇异（NLPARMX，KINER = ON）。惯性刚度（见式（3-13））在一个（准）静态分析中被添加到刚度矩阵 K 上。在选择 DTSCQ 中应注意如果附加质量太大可能会导致不正确的结果，这种功能类似于

惯性释放分析。

$$K_{inertia}=1/(DTSCQ\times dt)^2 M \quad (3\text{-}13)$$

有时候迭代过程会停止并出现 TIME STEP LIMIT ERROR。这说明时间步长达到 DTMIN。

3．隐式（准）静态

通过启动线性分析或者特征值分析检查是否有刚体运动。

重新检查参数数值和参数单位（材料属性和载荷等）。有时候查看中间过程动画输出结果也很有用。

增加载荷增量步数（NLPARM,NINC），减少最低时间步（NLPARMX,DTMIN）或者减少最大时间步（NLPARMX,DTMAX）。

如果发生了后屈曲，则启动 Riks 方法（NLPARMX,TSCTRL=RIKS）。

在.out 文件中检查迭代过程中位移、力和能量的残余值，找出哪一个收敛判别准则引起的发散，然后修改收敛控制准则（NLPARM,CONV）和放宽容差（NLPARM,EPSU,EPSW,和 EPSP）。注意，减小收敛容差可能导致不准确的结果。

如果位移和转动很小，则利用小位移选项（PARAM,SMDISP,1）。

4．隐式动态

重新检查参数数值和参数单位（材料属性和载荷等）。有时候查看中间过程动画输出结果也很有用。

增加起始时间步（TSTEPNL,NX），减少最小时间步（NLPARMX,DTMIN）或者减少最大时间步（NLPARMX,DTMAX）。

在.out 文件中检查迭代过程中位移、力和能量的残余值，找出哪一个收敛性判别准则引起的发散，然后修改收敛控制准则（NLPARM,CONV）和放宽容差（NLPARM,EPSU,EPSW,和 EPSP）。注意，减小收敛公差可能导致不准确的结果。

如果位移和转动很小，则利用小位移选项（PARAM,SMDISP,1）。

5．局限性

如果遇到 Bulk Data 不支持的数据输入，则求解过程将会终止。

以下 Bulk Data 属性和单元无法转换：

PBUSHT（部分转换）

PCOMP，PCOMPP，PCOMPG

PDAMP，CDAMPi

PGAP，CGAP，CGAPG （部分不允许摩擦）

PMASS，CMASSi

PSHEAR，CSHEAR

PVISC，CVISC

PWELD，CWELD

其他目前不能转换的 Bulk Data 项（载荷除外）：

CORD1C，CORD1S，CORD2C，CORD2S

DMIG

MAT2，MAT4，MAT5，MAT8，MAT9，MAT10

MATTi，TABLEST

MPC，MPCADD

RBAR，RBE1，RROD

目前不能转换的相关载荷：

FORCE1，MOMENT1

PLOAD1，PLOAD2

PLOAD4 （部分不能使用 N1、N2 和 N3）

RFORCE

TLOAD1，TLOAD2

3.2　非线性分析实例

3.2.1　弯板的非线性隐式分析

模型介绍：一块长方体薄板下面两端支撑，在上表面施加载荷，如图 3−8 所示。

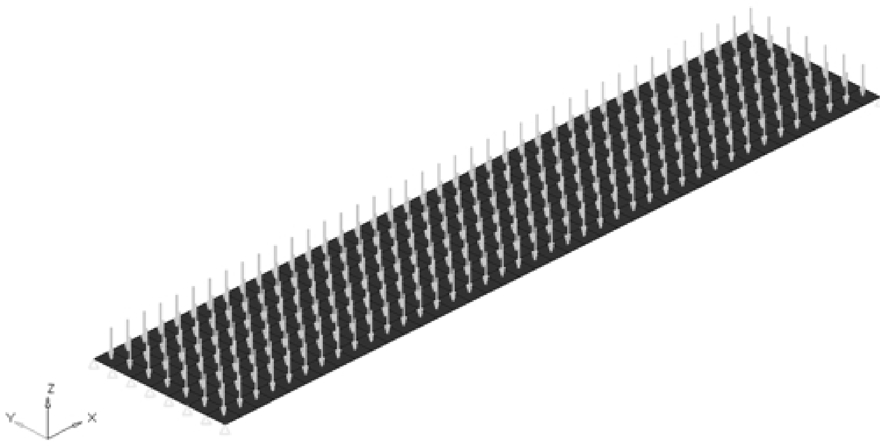


图 3−8　分析模型

薄板的具体数值如下。

单位：长度 mm，时间 s，质量 T，压力 N，应力 MPa。

长度：1000 mm；宽度：200 mm；厚度：4.0 mm。

材料：钢，使用 Johnson-Cook 弹塑性法则。

初始密度（ρ）：7.90e−9 kg/mm^3；弹性模量（E）：200000 MPa；泊松比（ν）：0.29；屈服应力（σ_0）：100.0 MPa；硬化参数（b）：1.0MPa。

施加的载荷：0.02 MPa，垂直施加到薄板上。

仿真时间：0～1.0 s。

本练习包括以下内容：创建塑性材料和相应的壳单元属性，创建边界条件和强制速度，创建隐式分析，提交任务及查看结果。

STEP 01 导入模型并删除 omit 卡片

（1）启动 HyperMesh 并在 User Profiles 对话框中选择 RADIOSS Bulk Data。

（2）在下拉菜单中单击 file→Import→solver deck 导入 plate.nas 文件。

（3）在左侧 model 页面中找到 omit 卡片，右击选择删除。

STEP 02 定义单位系统

（1）从 Analysis 页面选择 control cards。

（2）选择 DTI_UNITS，设置参数如图 3-9 所示，然后单击 return 回到主面板。

			MASS	FORCE	LENGTH	TIME
DTI	UNITS	1	MGG	N	MM	S

图 3-9　设置单位制

STEP 03 更新材料

（1）单击 Material 按钮切换到 update 子面板。

（2）选中 MATS 复选框，选择材料 MAT1_1，单击 update/edit。

（3）选中 MATX 复选框，选择 MATX02，为几何非线性分析中 Johnson-Cooke 弹塑性材料定义另外的材料属性。

（4）输入图 3-10 中的数据，单击 return 两次回到主面板。

	ID	[E]	[G]	[NU]	[RHO]	[A]	[TREF]	[GE]
MAT1	1	2.0e+05		0.290	7.9e-06	1.2e-05		
	[ST]	[SC]	[SS]					
	MID	A	B	[N]	[EPSMAX]	[SIGMAX]	[C]	[DEPS0]
MATX02	1	100.000	1.000					
	[ICC]	[FSMOOTH]	[FCUT]	[M]	[TMELT]	[RCP]		

MATS1
MATT1
MAT4
MAT5
MATFAT
MATX...
MATX02

reject
default
abort
return

图 3-10　创建材料

STEP 04 更新属性

（1）单击 Properties 按钮切换到 update 子面板。

（2）选择 prop 为 PSHELL_1，单击 update/edit。

（3）选中 PSHELLX 复选框，为几何非线性分析定义额外的 SHELL 属性。

（4）输入图 3-11 中的数据，单击 return 两次回到主面板。

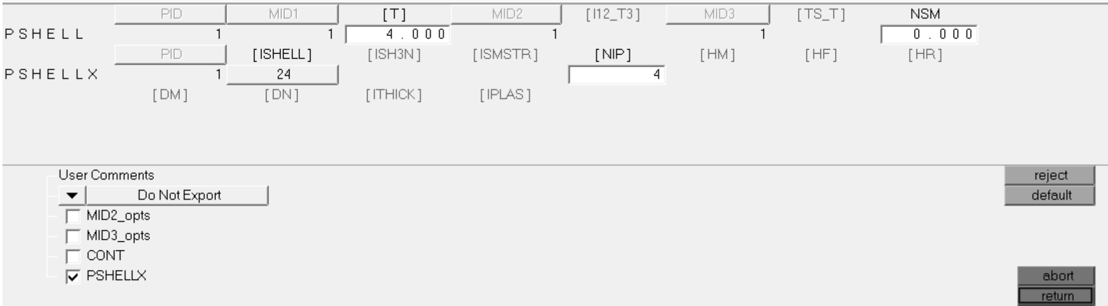


图 3-11　设置属性

STEP 05 创建边界条件

（1）单击 Load Collectors 按钮。

（2）切换到 Create 子面板创建输入载荷集名字 LC_SPC 并将卡片项设置为 no card image，单击 create→return。

（3）从 Analysis 页面选择 constraints，切换到 create。

（4）在 entity selector 选择 nodes，单击 nodes 选择节点，如图 3-12 所示。

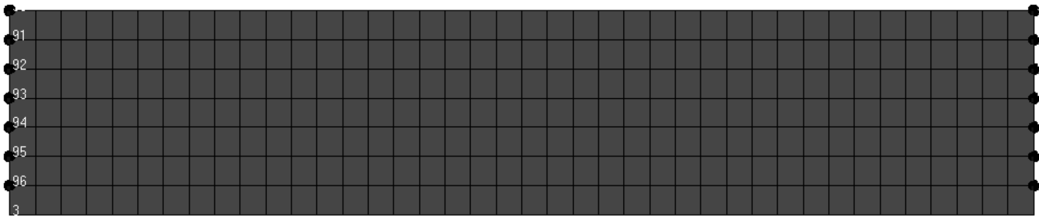


图 3-12　创建约束

（5）选择自由度 dof1 和 dof3，load types 选择 SPC 然后单击 create。

（6）选择下面的两个点，如图 3-13 所示。

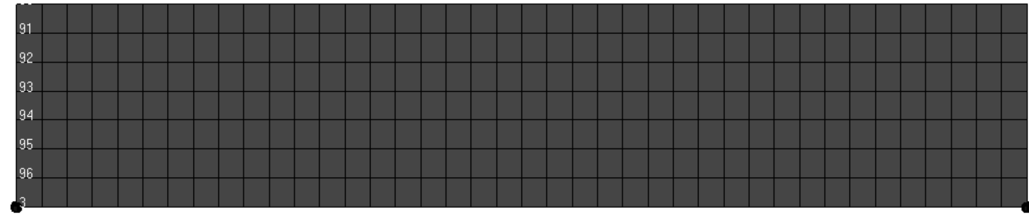


图 3-13　创建约束

（7）选择自由度 dof1、dof2 和 dof3，load types 选择 SPC，然后单击 create，单击 return 回到主面板。

STEP 06 创建强制载荷

（1）单击 Load Collectors 按钮 。
（2）创建一个载荷集 LC_PLOAD 卡片设置为 no card image。
（3）单击 create，然后单击 return。
（4）选择 Analysis→pressures 切换到 create 子面板。
（5）entity selector 转变为 elems，单击 elems 选择 all elements。
（6）单击 magnitude 旁边的 toggle=选择 constant vector。
（7）在 magnitude 文本框中输入−0.02。
（8）在 load types 中，确保选择 PLOAD 作为载荷类型。
（9）单击 create→return。
（10）单击 Load Collectors 按钮 。
（11）创建一个载荷集 TH_IMPLOAD，在 card image 设置为 TABLED1。
（12）单击 create/edit。
（13）利用图 3−14 所示的数据创建一条载荷曲线，单击 return。

	ID	XAXIS	YAXIS	
TABLED1	3	LINEAR	LINEAR	
	x(1)	y(1)	x(2)	y(2)
	0.000	0.000	1.000	1.000

User Comments
Hide In Menu/Export
TABLED1_NUM = 2
reject
default
abort
return

图 3−14　创建 TABLED1 卡片

（14）仍然在 load collectors 面板创建一个新的载荷集 LC_IMPLOAD，并在 card image 设置为 NLOAD1，单击 create/edit。

（15）EXCITEID 选 LC_PLOAD，TID 选 TH_IMPLOAD，TYPE 中选 LOAD，单击两次 return 返回主面板，如图 3−15 所示。

	SID	EXCITEID	SENSID	TYPE	TID	[B]	[C]
NLOAD1	4	2		LOAD	3		

图 3−15　创建 Nload1 卡片

STEP 07 定义隐式分析参数

（1）单击 Load Collectors 按钮 。
（2）创建一个载荷集 LC_NLPARM，card image 设置为 NLPARM。

（3）单击 create/edit。

（4）CONV 选择 P (force)，在 EPSP 文本框中输入容差值 0.01，如图 3–16 所示。

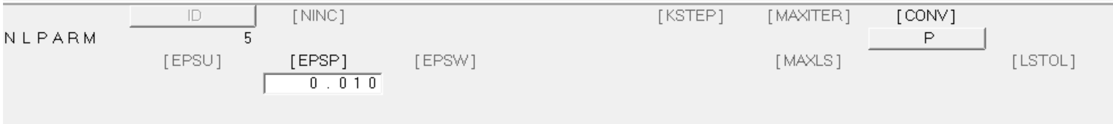


图 3–16　创建 NLPARM 卡片

（5）单击 NLPARMX。

（6）输入数据如图 3–17 所示，更多细节查看 NLPARMX 卡片。

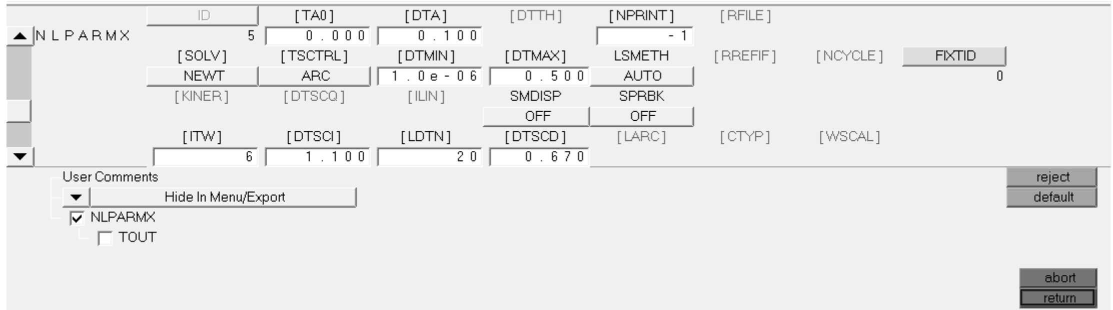


图 3–17　设置 NLPARMX 卡片

（7）单击两次 return 返回主面板。

STEP 08　定义输出控制参数

（1）从 Analysis 页面选择 control cards。

（2）单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST。

（3）选择 DISPLACEMENT、ELFORCE、OLOAD、STRESS 和 STRAIN 并设置 Option 为 Yes，单击两次 return 回到主面板。

STEP 09　创建隐式分析工况

（1）从 Analysis 页面选择 load steps。

（2）在 name 文本框中输入 sub_nlgeom_implicit。

（3）对于 TYPE 选择 geom non-linear(impl static)。

（4）选中 SPC 复选框，在 SPC 的右边出现一个文本框。

（5）单击 entry 文本框选择 LC_SPC。

（6）选中 NLOAD 复选框定义强制速度，在 NLOAD 的右边出现文本框。

（7）单击 entry 栏选择 LC_IMPLOAD。

（8）选中 NLPARM 的复选框定义非线性分析控制参数，在 NLPARM 的右边出现文本框。

（9）单击 entry 栏选择 LC_NLPARM。

（10）选中 TTERM 复选框，定义几何非线性分析工况终止时间，在 TTERM 的右边出现的文本框中输入 1.0，单击 create 创建 RADIOSS 工况，如图 3−18 所示。

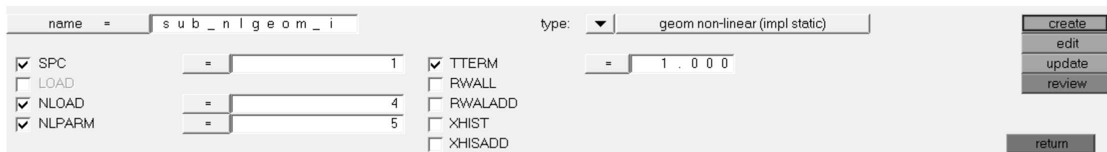


图 3−18　创建非线性分析工况

（11）单击 return 回到主面板。

STEP 10 提交计算

（1）从 Analysis 页面选择 RADIOSS。

（2）单击 save as 选择保存文件的地址。

（3）在 File Name 中输入 plate.fem，单击 Save。

（4）设置 export options 为 all，run options 为 analysis，memory options 为 memory default，然后单击 RADIOSS 启动 RADIOSS 求解。

（5）求解结束后，结果文件将存储在输入文件所在的目录中。plate_hole.out 用于查找错误，如果出现错误，这些信息有助于调试。

STEP 11 查看分析结果

（1）利用 HyperView 打开.H3D 文件，查看应力、应变和位移云图，如图 3−19～图 3−21 所示。

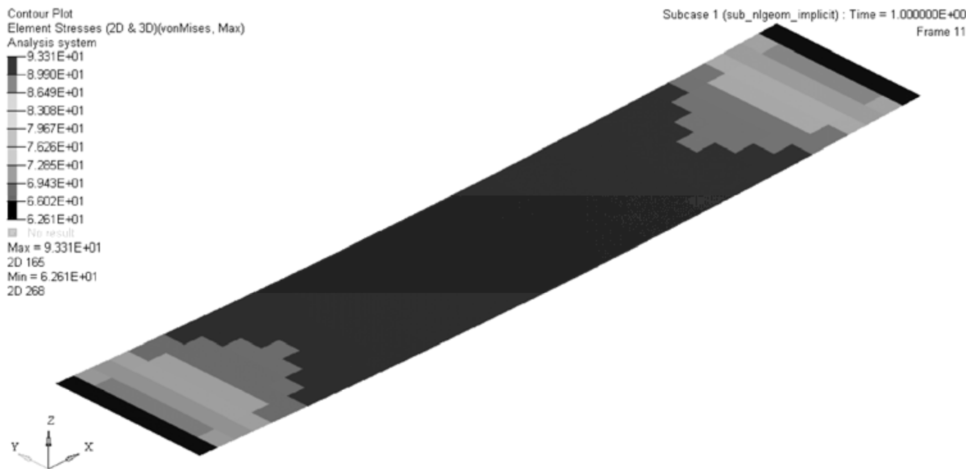


图 3−19　单元应力云图

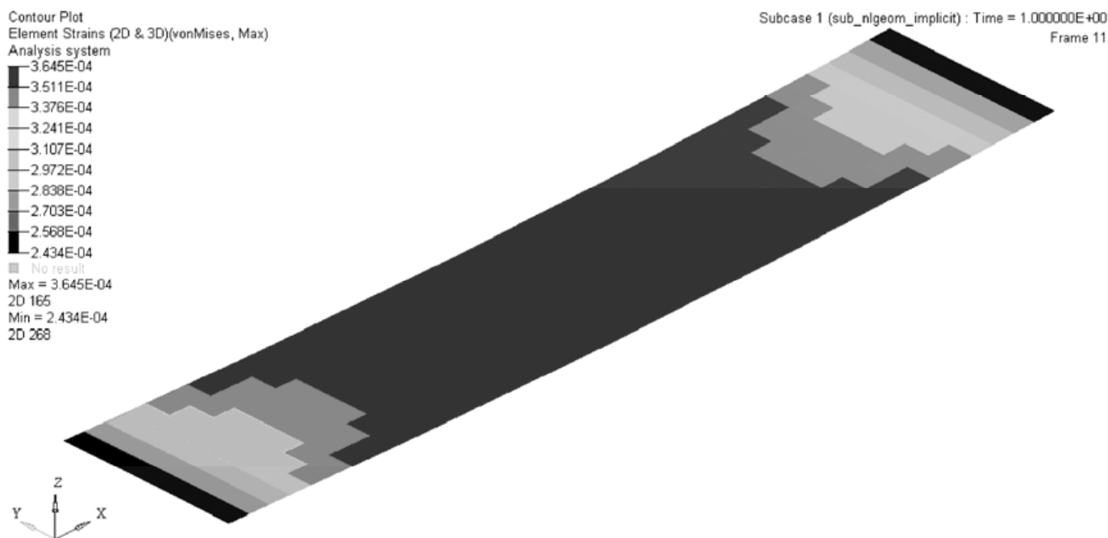


图 3-20　单元应变云图

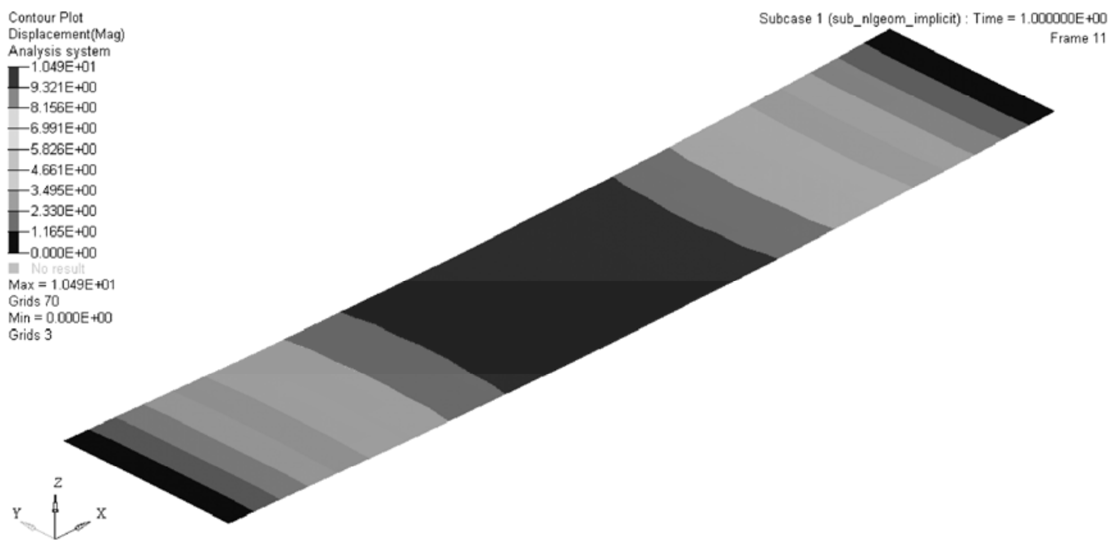


图 3-21　单元位移云图

3.2.2 接触及弹塑性分析

本节演示如何在 RADIOSS Bulk Data 中进行非线性小位移分析，其中包括弹塑性材料、接触和在前一个非线性负载基础上继续进行非线性求解。

图 3-22 是此次练习中用到的模型结构，两个由弹塑性钢材制成的方块。在第一个非线性工况中，压力载荷施加到方块的顶部，顶部的角分别约束 X、Y 方向自由度，下面方块的底部角约束住 X、Y 和 Z 三个方向自由度。第二个非线性工况是对前一个有载荷情况下继续进行非线性求解，模拟载荷去掉后的情况。

方块的尺寸和材料参数如下。

单位：长度 mm，时间 s，质量 T，力 N，应力 MPa。

上面的方块：72 mm×72 mm；下面的方块：100 mm×100 mm。

方块厚度：20mm。

材料：钢，弹塑性。

初始密度（ρ）：7.90e−9 kg/mm^3；弹性模量（E）：210000 MPa；泊松比（ν）：0.3；屈服应力（σ_0）：850.0 MPa。

施加压力：1000.0 MPa，施加在方块的顶部。

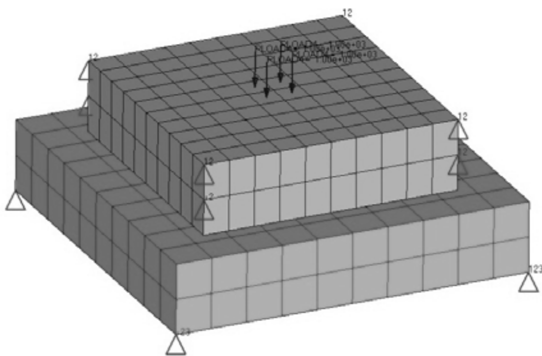


图 3−22　模型和加载说明

本节包括如下内容：创建弹塑性材料，定义接触，定义非线性参数，为第一个工况创建 NLSTAT 分析（有加载），为第二个工况创建 NLSTAT 分析（无加载），提交计算并查看结果。

STEP 01 打开模型

（1）启动 HyperMesh，选择 RADIOSS Bulk Data 模板。

（2）在下拉菜单中选择 file→open，弹出 openfile 窗口。

（3）在 Hyperworks 安装路径<install_directory>/tutorials/hwsolvers/RADIOSS/.找到 nlstat.hm，单击 Open 打开文件。

STEP 02 创建弹塑性材料

首先，需要定义应力与塑性应变曲线。

（1）在 Tab 区，单击 Utility→TABLE Create。

（2）单击 Create/Edit Table 设置表格类型为 TABLES1，单击 Next。

（3）选中 Create New Table 单选按钮，在 Name 文本框中输入 stress-strain。

（4）输入 X 和 Y 的值，单击 Apply，然后单击 OK 关闭对话框，如图 3−23 所示。

（5）单击工具栏中创建材料按钮，切换到 Update 子面板。

（6）选中 MATS 复选框，选择 material steel，单击 update/edit。

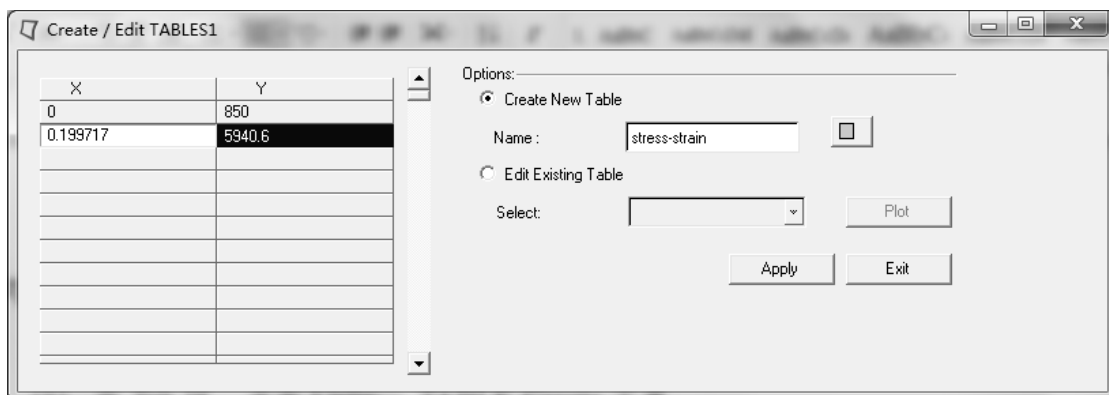


图 3-23　输入应力应变曲线

（7）选中 MATS1 复选框，为 NLSTAT 分析定义弹塑性材料。

（8）单击 TID，选择 stress-strain。

（9）输入如图 3-24 所示的数据，[TYPSTRN] 为 1 说明指定的是应力（*Y*）和塑性应变（*X*），然后单击 return 两次返回主面板。

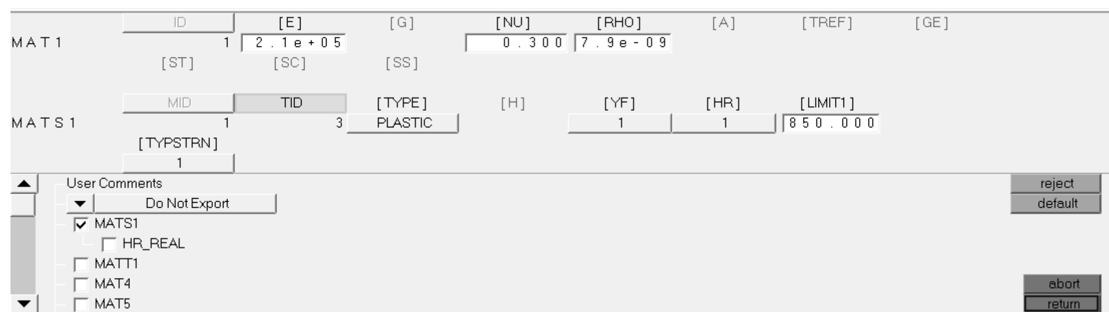


图 3-24　创建非线性材料

STEP 03 定义两个方块的接触面

（1）在 Analysis 页面中单击 entity sets 面板。

（2）在 name 文本框中输入 top。

（3）在 card image 文本框中输入 SET_ELEM。

（4）切换 entity 选择 props，如图 3-25 所示。

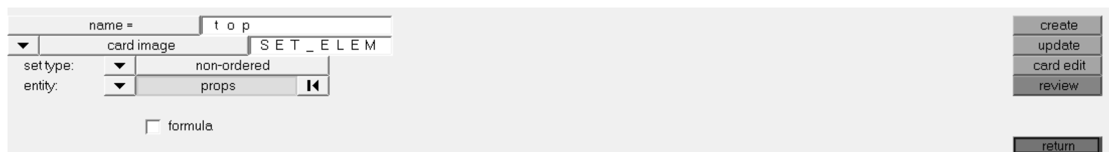


图 3-25　创建单元集

（5）单击 props 选择 Solid1，然后单击 create。

（6）在 name 文本框中输入 bottom，重复步骤（3）～（5），选择 Solid2，单击 return 返回主面板。

（7）单击 interfaces 面板切换到 create。

（8）在 name 文本框中输入 solid_contact。

（9）在 type 中选择 CONTACT，然后单击 create。

（10）单击 add 将 master 和 slave surfaces 添加到接触定义中。

（11）切换 master 为 sets，选择 bottom，单击 update。

（12）切换 slave 为 sets，选择 top，单击 update，如图 3–26 所示。

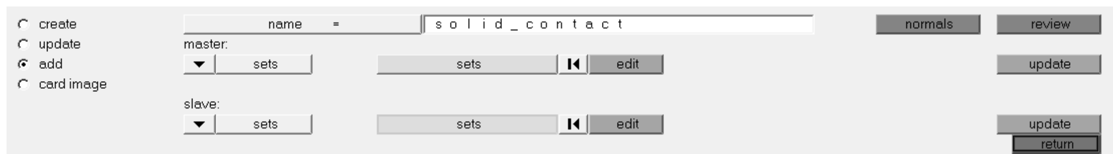


图 3–26　创建接触

（13）单击 review 查看界面，如图 3–27 所示。

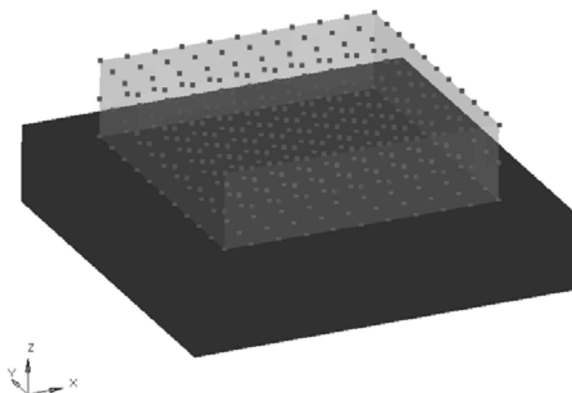


图 3–27　查看从节点和主面定义

（14）单击 card image，然后单击 edit 指定接触定义，如图 3–28 所示。单击 return 两次返回主面板。

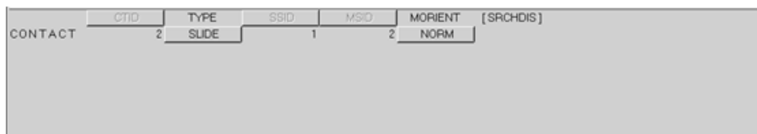


图 3–28　CONTACT 卡片设置

STEP 04 定义非线性参数

（1）在工具栏中单击 Load collectors 按钮，切换到 create。

（2）在 loadcol name 中输入 nlparm。

（3）card image 选择 NLPARM，单击 create/edit 选择默认值，如图 3−29 所示。

（4）单击 return 两次返回主面板。

	ID	[NINC]		[KSTEP]	[MAXITER]	[CONV]
NLPARM	4	10			25	UPW
	[EPSU]	[EPSP]	[EPSW]		[MAXLS]	[LSTOL]
	0.001	0.001	1.0e-07			

图 3−29　定义非线性分析参数

STEP 05 创建第一个非线性工况（有载荷）

（1）单击 loadsteps 面板，在 name 文本框中输入 loading。

（2）切换 type 到 non-linear quasi-static。

（3）选中 SPC 复选框，在 SPC 的右边出现一个文本框。

（4）单击=选择 SPC 载荷集。

（5）选中 LOAD 复选框，在 LOAD 的右边出现一个文本框。

（6）单击=选择 pressure 载荷集。

（7）选中 NLPARM 复选框，在 NLPARM 的右边出现一个文本框。

（8）单击=选择 nlparm 载荷集，单击 create，如图 3−30 所示。

name = loading　type: non-linear quasi-static　create　edit　update　review
☑ SPC = 2　☐ MPC
☑ LOAD = 1　☐ TEMP
☐ SUPORT1　☑ NLPARM = 4
☐ DEFORM　return

图 3−30　创建第一个载荷工况

STEP 06 创建第二个非线性工况（无载荷）

（1）在 name 文本框中输入 unload。

（2）确保 LOAD 复选框框没有选中。

（3）保持 SPC 和 NLPARM 复选框框被选中，单击 create，如图 3−31 所示。

name = unload　type: non-linear quasi-static　create　edit　update　review
☑ SPC = 2　☐ MPC
☐ LOAD　☐ TEMP
☐ SUPORT1　☑ NLPARM = 4
☐ DEFORM　return

图 3−31　创建第二个载荷工况

（4）单击 edit，选择 CNTNLSUB 对先前的工况继续求解，单击 return 两次回到主面板，如图 3−32 所示。

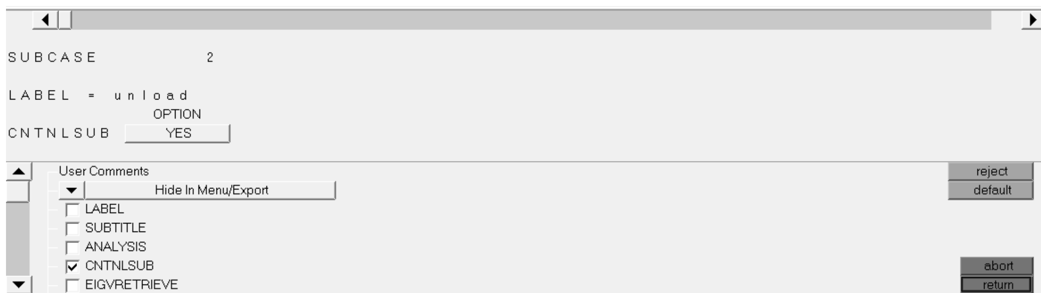


图 3-32　设置连续工况

STEP 07 定义输出控制参数

（1）进入 Analysis→control cards→GLOBAL_OUTPUT_REQUEST。

（2）设置 CONTF、DISPLACEMENT、STRAIN 和 STRESS 的 Option 为 Yes。

（3）在 STRAIN 下设置 TYPE(1)为 PLASTIC，单击 return 两次回到主面板。

STEP 08 提交计算

（1）从 Analysis 页面选择 RADIOSS。

（2）单击 save as 选择要保存文件的地址。

（3）在 File Name 中输入 nlstat_complete.fem，单击 Save。

（4）设置 contact definition 为 all，run options 为 analysis，memory options 为 memory default，然后单击 RADIOSS。

STEP 09 查看分析结果

（1）利用 HyperView 查看位移、von Mises 应力、塑性应变和接触压力，如图 3-33～图 3-36 所示。

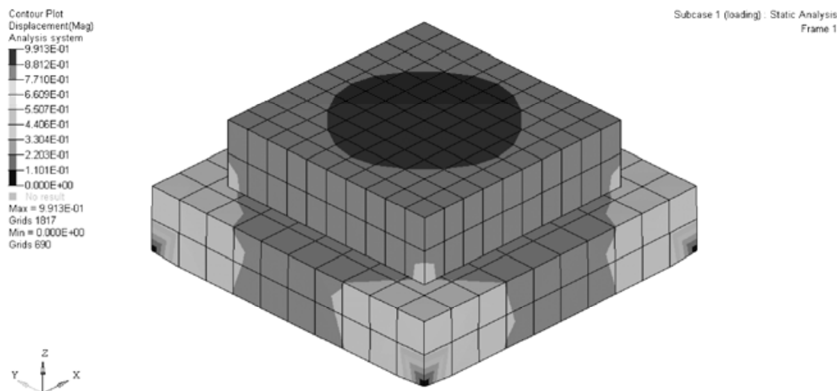


图 3-33　有载荷情况下方块的位移图

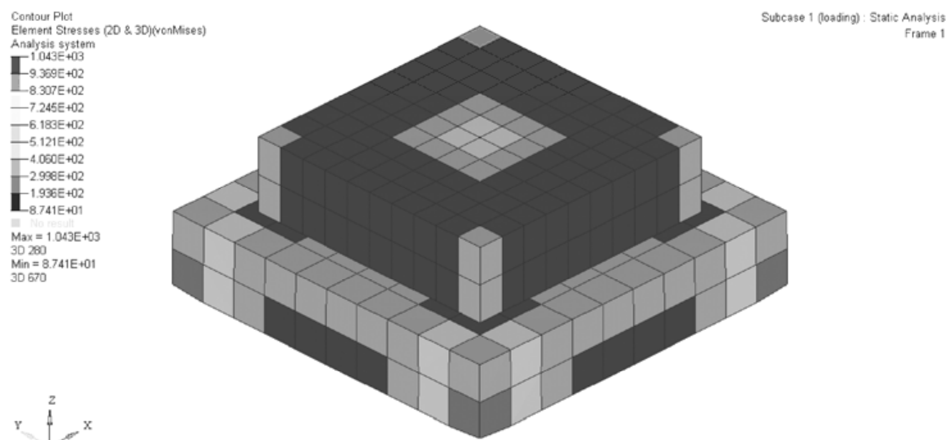


图 3-34　有载荷情况下的应力云图

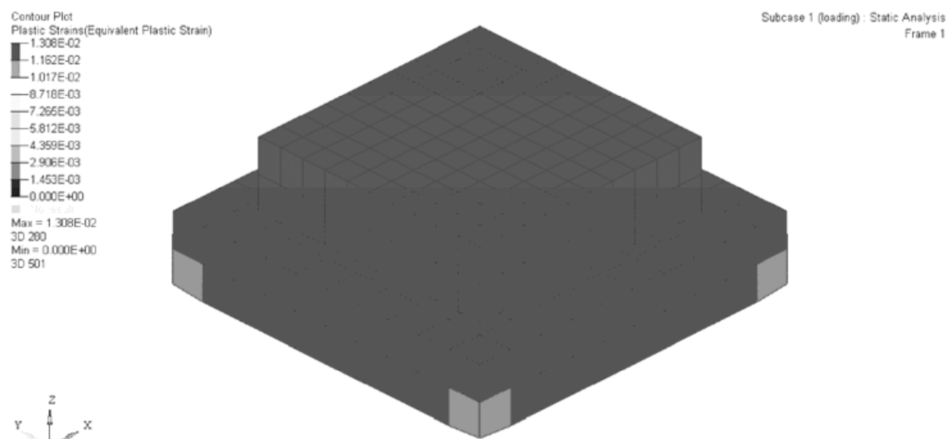


图 3-35　有载荷情况下方块的塑性应变云图

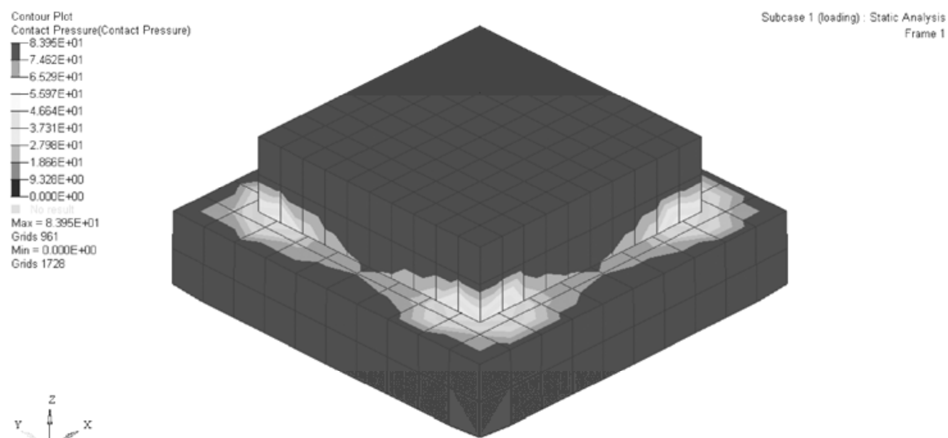


图 3-36　第一个工况下接触面的接触压力等值图

（2）切换到第二种工况，得出位移等值图（见图 3-37），查看没有载荷情况下的位移。

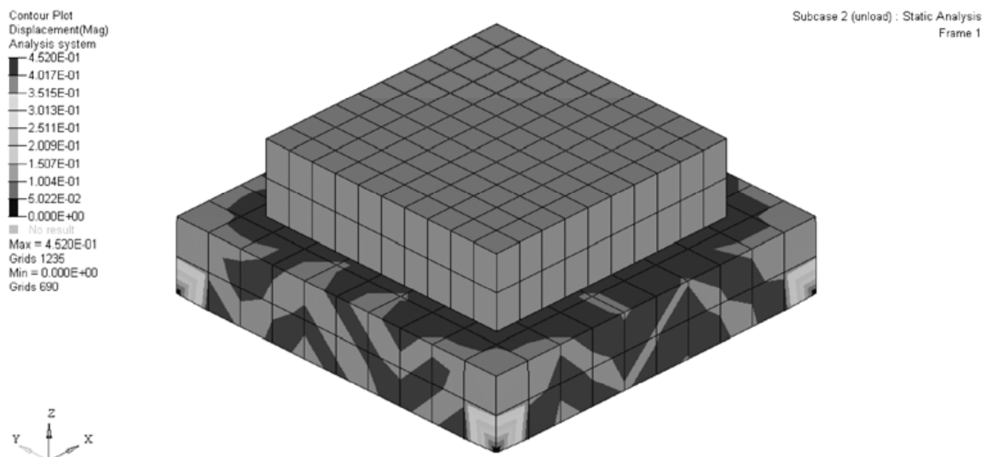


图 3-37　没有载荷情况下的位移等值图

3.3　本章小结

本章介绍了非线性分析的基本理论，包括线性分析与非线性分析的区别，非线性分析中的接触分析、几何大变形分析、弹塑性分析的设置方法。非线性分析的设置过程比线性分析要复杂得多，无论模型定义还是求解都比较耗时。在进行非线性分析前可以先进行线性分析了解一下模型的特性，根据线性分析的计算结果确定是否需要进行非线性分析。为了得到一个收敛的结果，需要在模型设置时尽量保持与实际的一致性，比如要有足够的支撑，材料模型要和实际吻合等。RADIOSS Bulk Data 中的几何非线性等分析序列会在后台使用 BLOCK 进行求解然后返回 H3D 结果，使用户感觉自己是在使用 Bulk Data。冲击碰撞等显式非线性分析建议使用 BLOCK 模块进行求解。

第 4 章

线性屈曲分析



屈曲是除强度、刚度外，工程中关心的另外一个重要课题。屈曲有时也叫失稳，主要发生在细长或薄壁结构上。线性分析中总是假定结构是稳定的，如果载荷消失后结构会回到加载前的状态，但是实际上这个假定在某些结构不一定成立。所以，静力分析有很大安全裕度的问题在实际中发生了失效。屈曲又分为线性屈曲和非线性屈曲，本章只介绍 RADIOSS Bulk Data 的线性屈曲分析功能，即计算过程不更新刚度矩阵，也不考虑载荷作用方向的改变。

本章重点知识

4.1 线性屈曲分析基本理论
4.2 线性屈曲分析实例
4.3 壳单元与实体单元连接方法介绍
4.4 本章小结

4.1 线性屈曲分析基本理论

使用有限元方法求解线性屈曲问题，首先在结构上施加一个参考载荷 P_{ref}，然后通过线性静态分析得到结构应力，该应力将用于后面的几何刚度矩阵 K_G 的构建。最后通过求解特征值问题得到屈曲因子，计算的方程见式（4−1）：

$$\left(K-\lambda K_{G}\right)x=0 \tag{4−1}$$

K 是结构的刚度矩阵，λ 是参考载荷的放大系数。通常求解特征值问题可以得到 n 个特征值（n 是系统的自由度数），但实际中通常只求解少量的特征值；x 是与特征值对应的特征向量。

求解特征值问题使用 Lanczos 方法。该方法只求解较低阶的一些特征值。最小的 λ 与结构屈曲有关，因为一旦发生屈曲结构已经失效，所以通常情况不需要考虑后面的特征值。屈曲临界载荷可以根据式（4−2）计算：

$$P_{Cr}=\lambda_{Cr}P_{ref} \tag{4−2}$$

为了进行线性屈曲分析，需要在 Bulk Data 段定义一个EIGRL卡片用于定义特征值提取阶数。EIGRL 卡片需要被 SUBCASE 段的METHOD引用。另外，还需要使用 SUBCASE 段的 STATSUB 引用参考的静态分析工况。线性屈曲分析不能使用惯性释放选项。

屈曲分析忽略 0 维单元，如 MPC、RBE3 和 CBUSH。它们可以在线性屈曲分析中使用，但不参与几何刚度矩阵 K_G 的构建。默认情况下，几何刚度矩阵 K_G 的构建也不考虑刚性单元的影响。如果希望考虑刚性单元的影响，可以通过设置 PARAM、KGRGD 和 YES 实现。

另外，用户也可以通过 SUBCASE 段的 EXCLUDE 指定几何刚度矩阵 K_G 构建时忽略的一些其他单元，这样可以指定只对部分的结构进行屈曲分析。EXCLUDE 指定的部分只是在构建几何刚度矩阵时被忽略，相当于一个带弹性边界条件的分析。所以，被排除部分仍然会在屈曲模态结果中有运动。

如果参考的静态载荷工况使用了惯性释放，则不能使用屈曲分析。因为在这种情况下刚度矩阵是半正定的，屈曲分析会由于矩阵奇异而终止。

某些 1D 单元和壳单元可以通过设定偏置，将由单元节点位置定义的原始位置的单元刚度矩阵进行转换。例如，壳单元可以通过 ZOFFS 沿法向偏移到单元平面以外的位置。在这种情况下，计算应力使用的材料矩阵或者纤维位置都是根据偏置参考平面定义的。类似的，单元力也是在偏置参考平面定义内输出的。

偏置用于所有单元矩阵（刚度、质量、几何刚度矩阵以及各种单元载荷，如重力），原则上说偏置可以用于包括屈曲分析在内的各种分析和优化，但是在解读结果的时候要慎重。因为如果没有偏置，一个典型的简单结构在临界载荷的作用下会立即分叉并失去稳定性，如图 4−1a 所示。如果有偏置，结构的稳定性会逐步失去，渐进地达到临界载荷，如图 4−1b 所示。

在实际中，使用偏置的结构在临界载荷达到之前可以有很大的变形（例如框架类结构或承弯的结构，即使不在单元卡片中使用 ZOFFS 也会以极限载荷的形式发生屈曲）。此外，对于完全非线性方法，在极限载荷路径上可能出现其他的不稳定点。

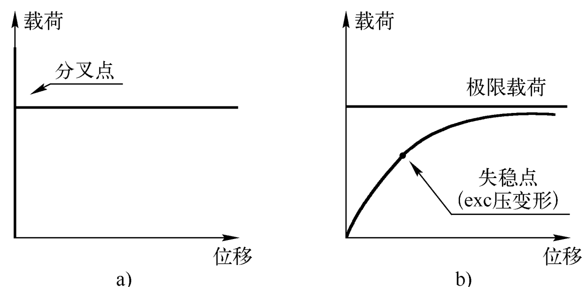


图 4-1　结构变形载荷图

4.2　线性屈曲分析实例

4.2.1　细长杆的三维屈曲分析

STEP 01 启动 HyperMesh，加载 RADIOSS（Bulk Data）用户模板并打开 buckling.hm 文件

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 User Profiles 对话框。如果没有弹出，可以从工具栏中的 Preferences 下拉菜单中进入。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

STEP 02 创建载荷集（Load Collector）

按照下面的步骤创建 3 个载荷集（SPC、Static load 和 Buckling load），并为每个载荷集选择一种颜色。

（1）在 Model Browser 视图窗口的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create 选项，然后选择 Load Collector，在 Name 文本框输入 SPC，并选择一种颜色。

（2）单击 Card image 左侧的选择开关，选择 no card image。

（3）单击 Create，创建一个名为 SPC 的载荷集。

（4）采用同样的方法创建名为 Static load 的载荷集。

（5）采用同样的方法创建名为 Buckling load 的载荷集。

（6）设置 Buckling load 载荷集的 Card image 为 EIGRL。这种卡片要求 RADIOSS 采用 Lanczos 方法计算模型的屈曲模态。

提示：模态分析和线性屈曲分析的本质都是特征值分析，所以都用到 EIGRL 卡。

（7）从调色板中选择一种不同的颜色分配给 Buckling load 载荷集。

（8）单击 creat/edit 按钮。

（9）单击 V1，保持其下面编辑区为默认值 0.0。

（10）单击 ND，在下面的编辑区域输入 2，按〈Enter〉键。这一步设置表明告诉 RADIOSS 提取模型的前二阶屈曲模态。

提示：做屈曲求解时提取二阶模态就足够了，但如果是进行优化分析则建议至少优化前 5 阶屈曲模态。

（11）单击 return 返回。

STEP 03 为模型创建载荷和边界条件

为了进行屈曲模态分析必须对一些节点进行约束，这里将按照下面的步骤创建这些约束并且把它们分配给 SPC 载荷集。

（1）在 Model Browser 窗口中展开 Load collector，右键单击 SPC，选择 Make Current，如图 4–2 所示。

（2）在主菜单区的 Analysis 面板中，选择 Constraints。

（3）选中图 4–3 所示的模型底面上的所有节点。

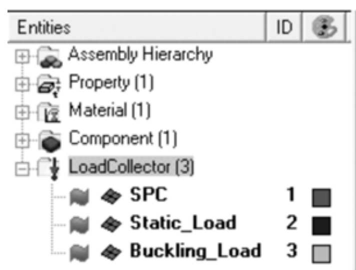


图 4–2　选择当前载荷组

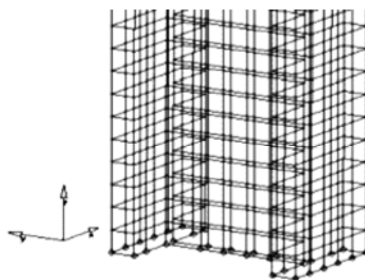


图 4–3　选择底面所有节点

（4）选定 dof1、dof2、dof3 三个自由度，单击 create 按钮创建，然后单击 return。

（5）在 Model Browser 窗口中展开 Load collector，右键单击 Static load，选择 Make current。

（6）在主菜单区的 Analysis 面板中选择 Forces。

（7）选中图 4–4 所示的模型的顶面上的所有节点。

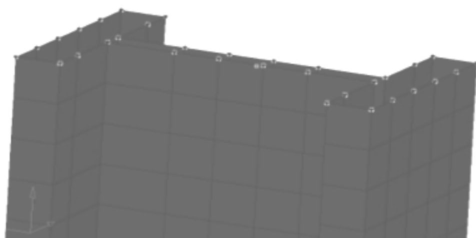


图 4–4　创建载荷

（8）在 magnitude=右侧文本框中输入−10000。

（9）单击 N1N2N3 旁边的选择开关，选择 Z-axis。

（10）单击 create 创建施加的力载荷，然后单击 return 返回。

STEP 04 创建载荷工况

建立边界条件的最后一步就是创建载荷工况。

（1）从面板区的 Analysis 面板进入 Loadstep 子面板。

（2）在 name=文本框中输入 Linear。

（3）设置 Type 子选项为 linear static。

（4）选中 SPC 复选框，在 SPC 右侧会出现一个文本框。

（5）单击 SPC 右侧的文本框，在载荷集列表中选择 SPC。

（6）选中 LOAD 复选框，采用与步骤（5）相同的方法选择 Static load 载荷集。

（7）单击 create 按钮。

这样就创建了一个名为 Linear 的 RADIOSS 线性静力分析载荷工况。该载荷工况包含 SPC 单点约束和 Static load 集中力，如图 4-5 所示。

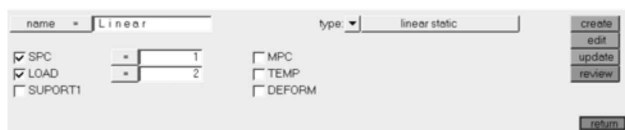


图 4-5　创建线性静力分析载荷工况

（8）单击 name=输入 Buckling。

（9）设置 Type 为 linear buckling。

（10）选中 SPC 复选框，在 SPC 右侧会出现一个文本框。

（11）单击 SPC 右侧的文本框，在弹出的载荷集列表中选择 SPC 集。

（12）选中 METHOD（STRUCT）复选框，在载荷集列表中选择 Buckling load。

（13）选中 STATSUB 复选框，在工况列表中选择 Linear。STATSUB 卡片为屈曲分析选择要参考的 Linear Static 载荷步，如图 4-6 所示。

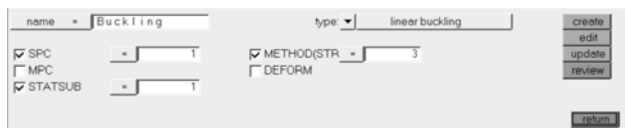


图 4-6　创建线性屈曲工况

（14）单击 create，创建 Buckling 载荷工况。

（15）单击 return，返回 Analysis 面板。

STEP 05 进行线性屈曲分析

（1）在 Analysis 面板，进入 RADIOSS 子面板。

（2）单击 input file 旁边的 save as，出现 save file 窗口。

（3）选择 RADIOSS 结果文件存入的路径，并命名（如 buckling.fem），单击 Save。

（4）设置 export options 为 all，run options 为 analysis，memory options 为 memory default，单击 Radioss 按钮，启动屈曲分析计算，如图 4-7 所示。

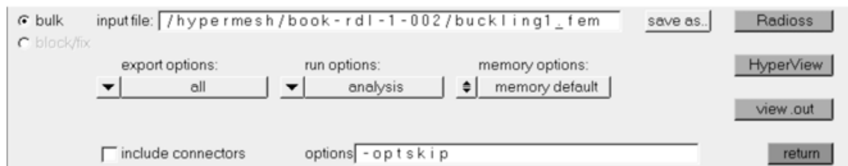


图 4-7　提交作业

下面介绍如何在 HyperView 中查看这些信息。

STEP 06 查看 Linear 载荷步的等效应力云图结果

（1）在 RADIOSS 面板中，单击 HyperView 按钮，启动 HyperView 并且加载包含模型和结果信息的 buckling.h3d 文件。

（2）在左侧视图窗口中单击 Load case view 按钮，在载荷下拉列表中选择 Subcase 1（Linear），在下面的下拉列表中选择 Static Analysis 选项，如图 4-8 所示。

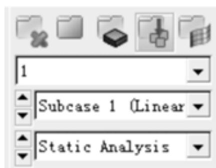


图 4-8　选择工况

（3）单击 Graphic 工具栏中的 Contour 按钮。

（4）Result type 选择 Element Stresses（2D&3D）选项，sub type 选择 Von Mises 选项。如图 4-9 所示。

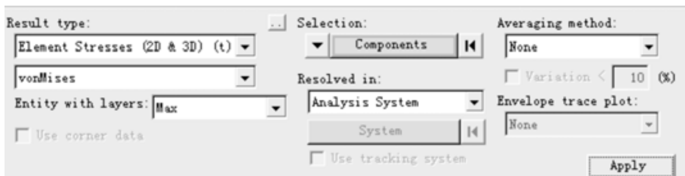


图 4-9　选择结果

（5）单击 Apply 显示等效应力云图，如图 4-10 所示。

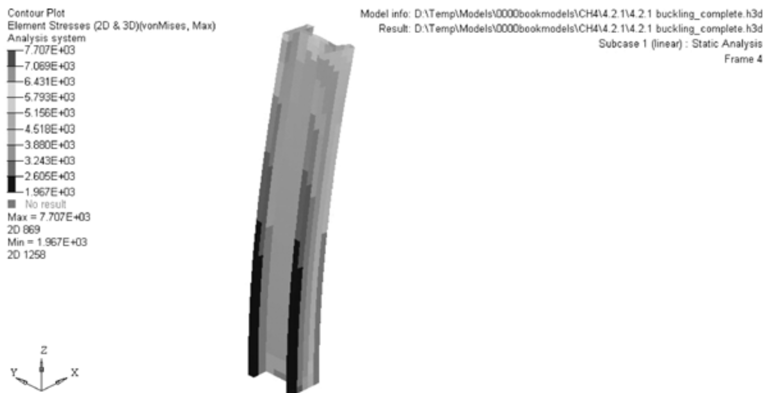


图 4-10　单元等效应力云图

STEP 07 查看模型 Buckling 载荷工况下屈曲模态的结果和动画

（1）单击 Display Control 面板中的 Clear Contour 按钮。

（2）在左侧视图窗口中单击 Load case view 按钮，在载荷下拉列表中选择 Subcase 2（Buckling），在下面的下拉列表中选择 Mode 1 选项，如图 4-11 所示。

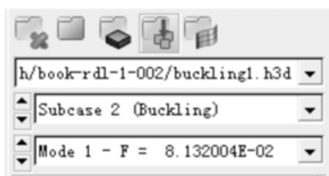


图 4-11 选择工况

（3）单击 Deformed 按钮。

（4）在 Deformed shape 下的 Value 文本框中输入数字 10。

（5）在 Undeformed shape 下的 Show 下拉列表中选择 Wireframe，如图 4-12 所示。

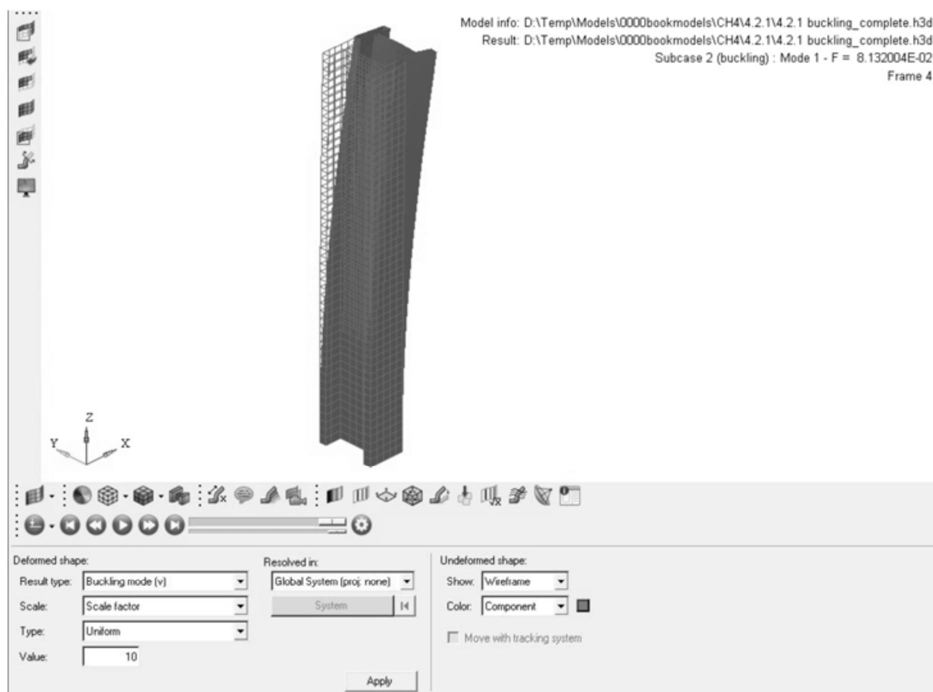


图 4-12 结构变形图

（6）在 animation toolbar 工具栏中设置动画，观看一阶模态动画。

提示：屈曲分析通常只需要查看第一阶屈曲模态，因为屈曲发生后结构已经不能继续像开始时一样承载了，也就是说第二阶屈曲模态已经没有物理意义了。

4.2.2 机翼模型的三维屈曲分析

本例将介绍使用 RADIOSS 做三维屈曲分析的步骤。图 4-13 所示即为本例中要用到的结构模型。

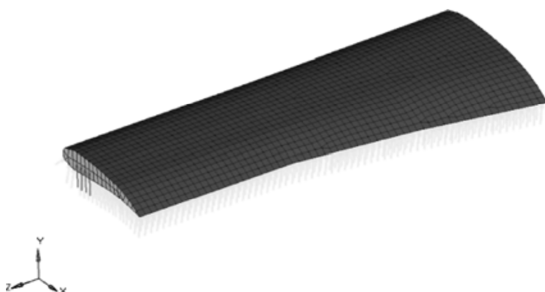


图 4-13　包含载荷和约束模型

设计要求：屈曲第一阶模态 >1.5×；静态最大位移< 20mm，Von Mises 应力< 70MPa。

STEP 01 启动 HyperMesh，加载 RADIOSS（Bulk Data）用户模板并打开 WING.hm 文件

该文件中已经包含了必要的单元、部件、属性和材料特性，并且已经设置好了静力分析的荷载。

STEP 02 运行静力分析，验证设计是否满足静力失效的要求

（1）进入 Analysis 中的 RADIOSS 面板。

（2）单击 input file 旁边的 save as，出现 save file 窗口。

（3）选择 RADIOSS 结果文件存入的路径，并为文件命名（如 WING.fem），单击 Save。

（4）设置 export options 为 all，run options 为 analysis，memory options 为 memory default。单击 RADIOSS 按钮，启动屈曲分析计算，如图 4-14 所示。

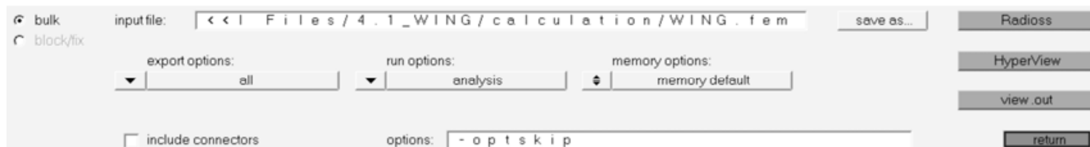


图 4-14　提交作业

STEP 03 在 HyperView 中查看位移和 Von Mises 应力

（1）在 RADIOSS 面板中单击 HyperView 按钮，启动 HyperView 并且加载包含模型和结

果信息的 WING.h3d 文件。

（2）在左侧视图窗口中单击 Load case view 按钮，在载荷下拉列表中选择 Subcase 1（PRESSURE），在下面的下拉列表中选择 Static Analysis 选项，如图 4-15 所示。

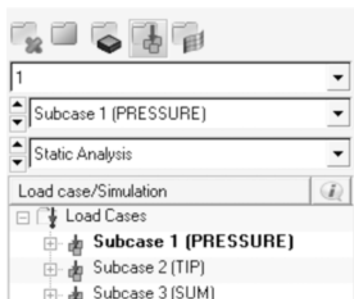


图 4-15　选取工况

（3）单击 Graphic 工具栏中的 Contour 按钮。

（4）在 Result type 中选择 Displacement（v）选项，sub type 选择 Mag 选项，如图 4-16 所示。

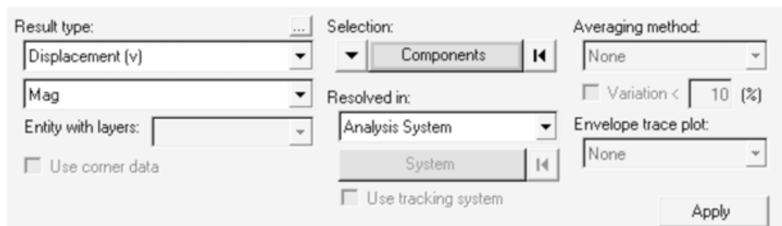


图 4-16　选择结果

（5）单击 Apply 显示位移云图，如图 4-17 所示。

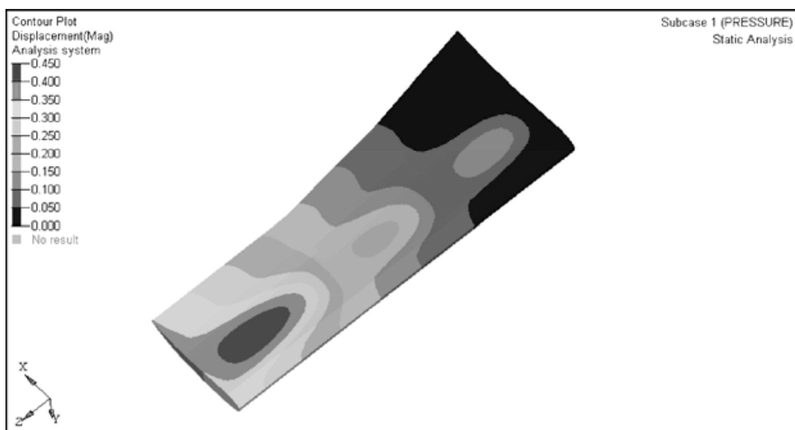


图 4-17　位移云图

（6）在 Result type 中选择 Element Stresses（2D and 3D）选项，sub type 选择 Von Mises 选项。单击 Apply 显示 Von Mises 应力云图，如图 4-18 所示。

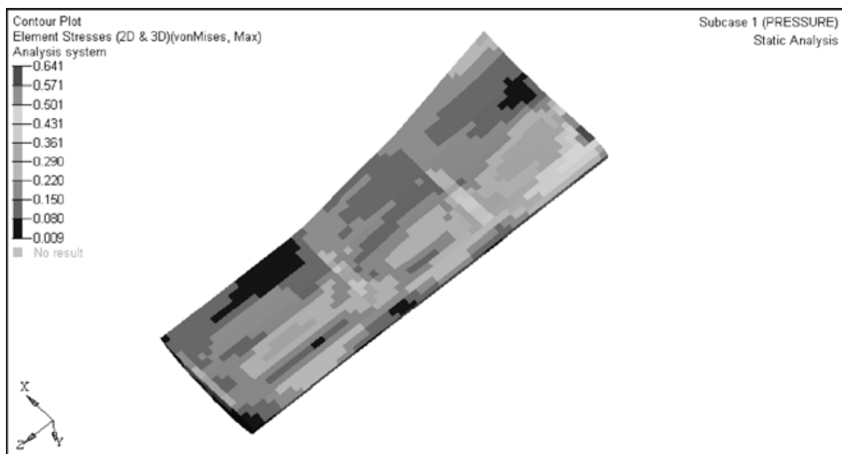


图 4−18　应力云图

（7）重复步骤（2）～（6），分别选择 Subcase 1（PRESSURE）、Subcase 2（TIP）和 Subcase 3（SUM），得到 3 种工况下的位移和等效应力云图，如图 4−19 所示。

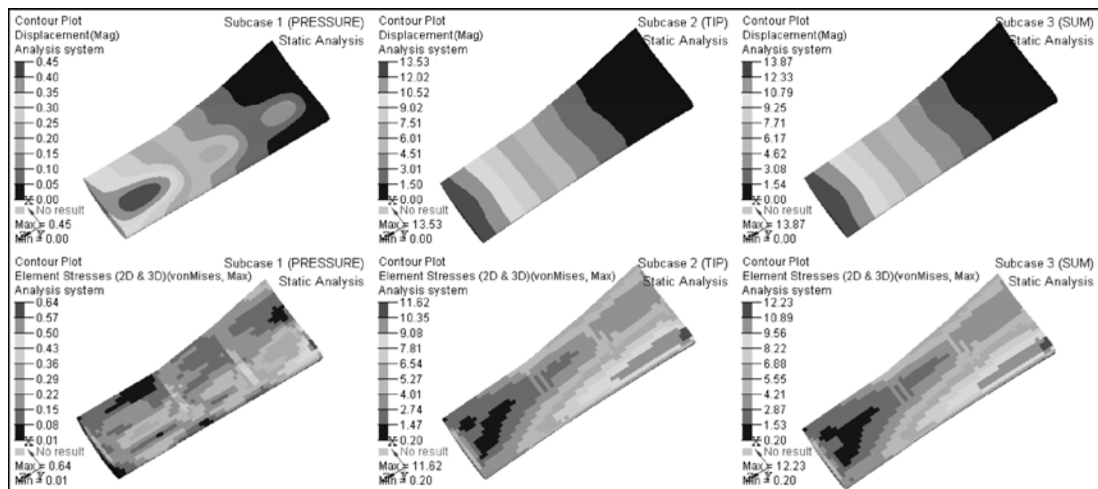


图 4−19　静态分析的位移和 Von Mises 应力结果

由结果可知，静态荷载下的位移和 Von Mises 应力满足设计要求。

STEP 04　创建线性屈曲分析载荷步

（1）单击按钮，创建一个 Load collector，在 loadcol name =文本框中输入 EIGRL，单击 Card image=，选择 EIGRL，如图 4−20 所示。该卡片要求 RADIOSS 采用 Lanczos 方法计算模型的屈曲模态。



图 4−20　创建 EIGRL 卡片

（2）单击 create/edit，创建一个名为 EIGRL 的载荷集，并编辑卡片 EIGRL，参数如图 4−21 所示。

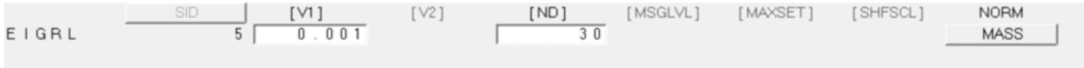


图 4−21　设置特征值提取参数

提示：负的屈曲因子没有物理意义，所以通常只需要求解大于 0 的第一个屈曲因子。

（3）创建 3 种工况下的屈曲分析载荷步。

（4）从面板区的 Analysis 面板进入 Loadstep 子面板。

（5）在 name= 文本框中输入 BUCK PRESSURE。

（6）设置 type 子选项为 linear buckling。

（7）选中 SPC 复选框，在 SPC 右侧会出现一个文本框。

（8）单击该文本框，在载荷集列表中选择定义好的约束 constraints。

（9）选中 STATSUB 复选框，单击其右侧出现的文本框，在载荷集列表中选择工况 1：PRESSURE。

（10）选中 METHOD（STRUCT）复选框，单击其右侧出现的文本框，在载荷集列表中选择定义好的 EIGRL 卡片。

（11）单击 create。

这样就创建了一个名为 BUCK PRESSURE 的 RADIOSS 线性屈曲分析载荷步。该载荷工况包含 constraints 单点约束和 PRESSURE 集中力以及一个 EIGRL 卡片，如图 4−22 所示。



图 4−22　创建第一个屈曲工况

重复以上步骤，分别建立另外两种工况下的屈曲分析载荷步，如图 4−23 和图 4−24 所示。

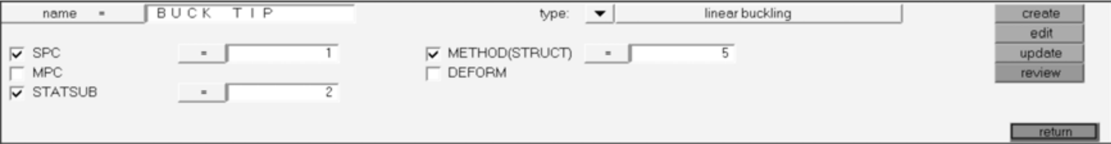


图 4−23　创建第二个屈曲工况



图 4−24　创建第三个屈曲工况

STEP 05 运行分析并查看屈曲模态

（1）在 Analysis 面板，进入 RADIOSS 子面板。

（2）单击 input file 旁边的 save as，出现 save file 窗口。

（3）选择 RADIOSS 结果文件存入的路径，并命名（如 WING.fem），单击 Save。

（4）设置 export options 为 all，设置 run options 为 analysis，设置 memory options 为 memory default，单击 Radioss 按钮，启动屈曲分析计算，如图 4−25 所示。

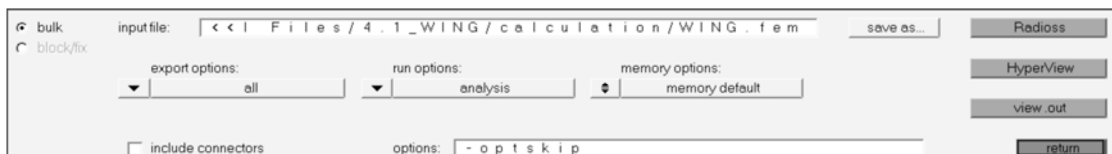


图 4−25　提交作业

（5）在 RADIOSS 面板中单击 HyperView 按钮，启动 HyperView 并且加载包含模型和结果信息的 WING.h3d 文件。

（6）在左侧视图窗口中单击 Load case view 按钮，在载荷下拉列表中选择 Subcase 4（BUCKPRESSURE），在下面的下拉列表中选择 Mode 1 选项，如图 4−26 所示。

（7）单击右侧图形窗口下的 Apply，得到一阶模态的变形图，如图 4−27 所示。

（8）重复步骤（6）～（7），得到另外 3 种工况下的一阶屈曲模态，如图 4−28 所示。

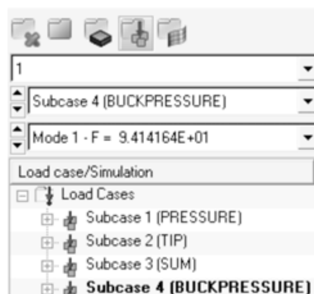


图 4−26　选择结构工况

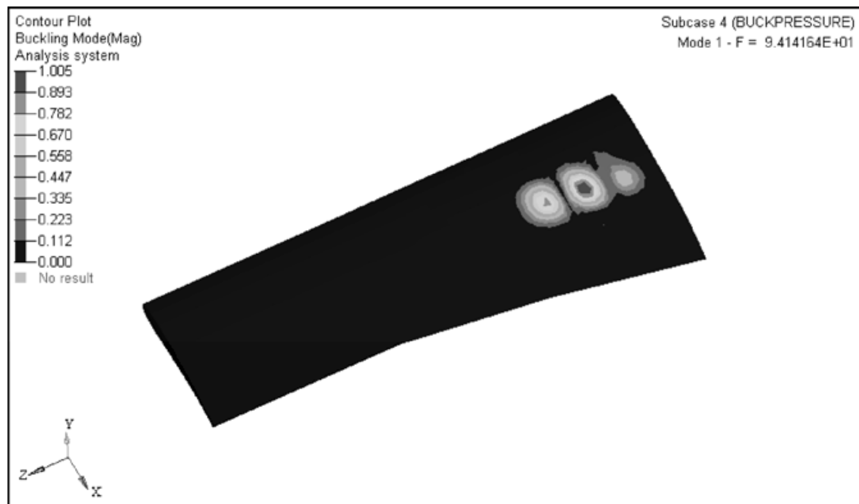


图 4−27　屈曲模态（一）

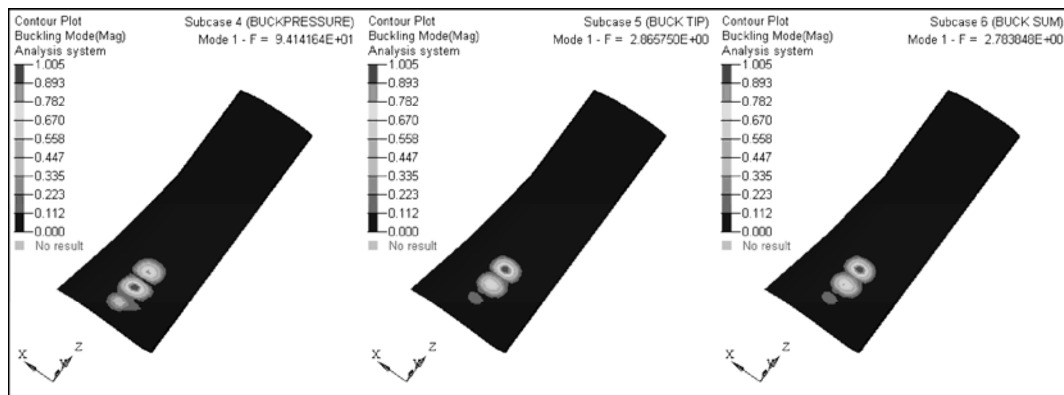


图 4–28　屈曲模态（二）

由结果可知 3 种工况下结构的第一阶屈曲模态均满足设计要求（Model 1>1.5 ×）。

4.2.3 预载荷的屈曲分析

STEP 01 启动 HyperMesh，加载 RADIOSS（Bulk Data）用户模板并打开 WING_Buckling.hm 文件

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 UserProfiles 对话框。如果没有弹出，可以从工具栏中的 Preference 下拉菜单进入。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

（4）在 File 下拉菜单中单击 Open，弹出 Open model 窗口。

（5）在光盘中找到 WING_Buckling.hm 文件。

本例中使用的模型是 4.2.2 完成的模型。

STEP 02 创建预载荷线性屈曲分析工况

（1）在 Analysis 面板中进入 loadsteps 子面板。

（2）在 name= 文本框中输入 Preload，type 选择 generic。

（3）激活 SPC，单击其右侧出现的文本框，选择 constraints 载荷集。

（4）激活 METHOD（STRUCT），单击其右侧出现的文本框，选择 EIGRL 载荷集。

（5）单击 next，激活 STATSUB（BUCKLING），单击其右侧出现的文本框，选择 SUM 工况。

（6）单击 next，激活 STATSUB（PRELOAD），单击其右侧出现的文本框，选择 SUM 工况。为了方便校对结果，这里对于 STATSUB（BUCKLING）和 STATSUB（PRELOAD）都选择同一个工况。这样新建的这个工况，相对于模型中 ID=6 的工况，只是多一个预载荷工况，结果有可比较性。

STEP 03 运行分析并查看结果

（1）在 Analysis 面板中进入 RADIOSS 子面板。

（2）单击 input file 旁边的 save as，出现 save file 窗口。

（3）选择 RADIOSS 结果文件存入的路径，单击 Save。

（4）设置 export options 为 all，设置 run options 为 analysis，设置 memory options 为 memory default，单击 RADIOSS 按钮，启动分析计算。

（5）在 RADIOSS 面板中单击 HyperView 按钮，启动 HyperView 并且加载包含模型和结果信息的 WING_Buckling.h3d 文件。

（6）在左侧视图窗口中单击 Load case view 按钮，在载荷下拉列表中选择 Subcase 7，注意观察在各阶模态下的屈曲因子（即 F=后面的数值）。再把载荷下拉列表切换成 Subcase 6，比较屈曲因子与 Subcase 7 下的对应值。Subcase 7 下的屈曲因子始终比 Subcase 6 下的对应值小 1。这就是预载荷发挥了作用，预载荷施加了与求解屈曲而参考的相同工况，即 STATSUB（BUCKLING）和 STATSUB（PRELOAD）都选择同一个工况，所以屈曲因子自然就减小 1。

4.3　壳单元与实体单元连接方法介绍

有时为了建模方便可以把一些特定零件的一部分划分壳单元，其他部分划分实体单元，由于壳单元每个节点有 6 个自由度而实体单元的节点只有 3 个平动自由度，所以如果直接采用共节点的连接方法将无法正确传递扭矩。下面介绍两种用于壳单元和实体单元连接的不同方法。

1．利用脚本自动创建 RBE3

STEP 01 打开模型

（1）单击 File→Open，浏览至模型所在路径，双击打开 2D-3D_connection.hm 模型文件。

网格模型如图 4−29 所示。

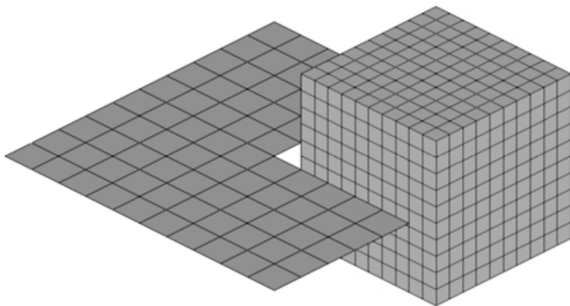


图 4−29　网格模型

STEP 02 找出 3D 单元的 faces

（1）进入主面板，单击 Tool→faces。

（2）选中所有 3D 网格，单击 find faces。左边模型树中自动增加一个名为 faces 的部件。根据需要只保留 faces 中连接部分的部分网格，本例中保留如图 4-30 所示的两排。

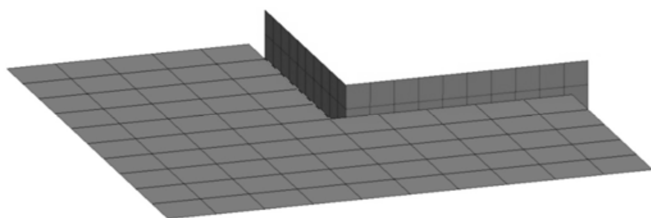


图 4-30　用于创建连接的部分网格

STEP 03 运行脚本文件

运行 Tcl/Tk 脚本可以使用以下几种方法。

- 从 File 下拉菜单中选择 Run→Tcl Script。
- 从工具栏上单击 Run Tcl Script 按钮。
- 在 Utility Menu 里创建一个按钮调用 Tcl/Tk 脚本。
- 从 command 使用*evaltclscript()命令执行脚本。
- 使用 hmbatch –tcl<filename>以批处理方式执行 HyperMesh。
- 从 command 窗口运行 Tcl/Tk 脚本可以使用 source 命令，如 source test.tcl。如果运行不在工作目录下的脚本，则可以使用加上全路径，如 source C:/My_scripts/test.tcl。

注意：Tcl/Tk 需要使用斜杠“/”而不是反斜杠“\”来表示路径，因为反斜杠是 Tcl/Tk 的保留字符。

如果文件名或路径包含空格时，则需要使用双引号" "或者大括号{ }扩起来，例如：

source "C:/Documents and Settings/Paul/My Documents/test.tcl"或 source {C:/Documents and Settings/Paul/My Documents/test.tcl}

（1）单击 File→Run→Tcl/Tk Script，浏览至脚本所在文件夹，双击打开 RBE3s_on_closest_nodes_4.tcl 脚本文件。主面板界面如图 4-31 所示。

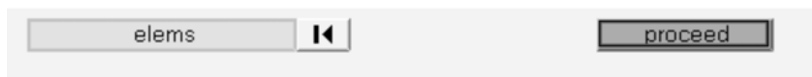


图 4-31　选择 independent 节点所在的网格

（2）根据需要选择 faces 中的网格。比如这里需要连接 3D 网格表面的 3 层节点，那就选择 2 层网格，如图 4-32 所示。

（3）单击 proceed，进入下一步，如图 4-33 所示。

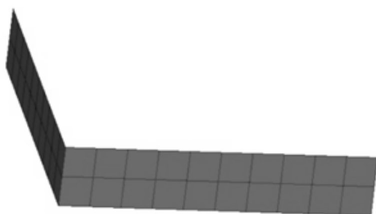


图 4-32　选择适当的网格



图 4-33　选择 dependent 节点所在的网格

（4）选择 2D 网格上需要连接的节点，如图 4-34 所示。

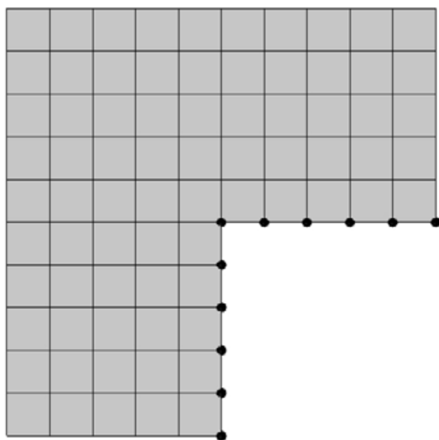


图 4-34　选择适当的节点

（5）单击 proceed，连接完成 RBE3 单元，如图 4-35 所示。

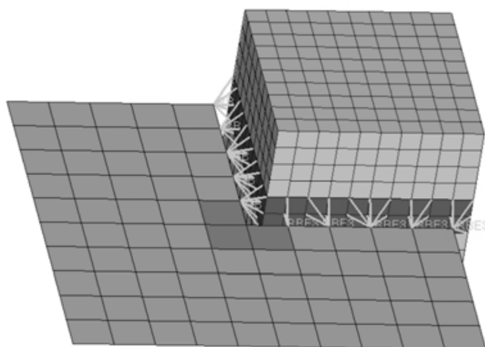


图 4-35　生成 RBE3

生成的 RBE3 单元会放置在一个自动生成的部件内。另外，未成功创建 RBE3 的 dependent 节点周围的单元会被单独放置在一个新的部件内。

图 4−36 中 RBE3 单元的 3 个 independent node 在同一条直线上，这时此处绕 *Z* 轴转动的自由度传递会有问题，需要进行调整。

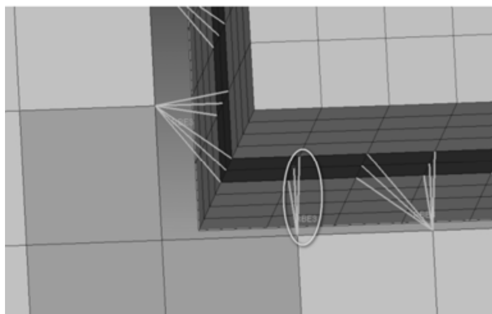


图 4−36　独立节点在一条直线上的 RBE3 单元

第一种解决办法是将 independent node 的自由度选项由默认的 123 改为 1236，即增加绕 *Z* 轴的转动自由度。

操作方法为在 1D/RBE3 面板中选中 update 单选按钮和 dofs 单选按钮，在图形区选择要更新的单元（只选择有问题的单元）后单击 set all，然后单击 update，如图 4−37 所示。



图 4−37　更新 RBE3 单元独立节点自由度

修改后的结果如图 4−38 所示。



图 4−38　更新 RBE3 单元独立节点自由度结果

第二种方法为直接为 RBE3 单元多选几个 independent node，dofs 选项设置不变。操作方法如图 4−39 所示。



图 4−39　为 RBE3 单元增加独立节点

操作结果如图 4−40 所示。

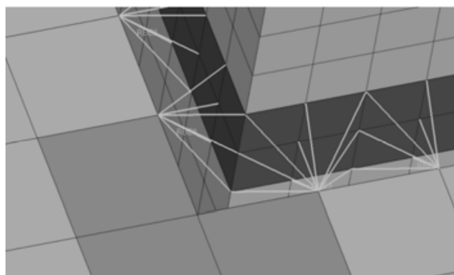


图 4−40　为 RBE3 单元增加独立节点后的结果

删除 faces，即完成 2D 与 3D 单元的连接。

2．将壳单元伸进实体单元 2 层（或 >2 层）

STEP 01 打开模型

选择 File→Open 菜单命令，浏览至模型所在路径，双击打开 2D-3D_connection_method2.hm 模型文件。网格模型如图 4−41 所示。

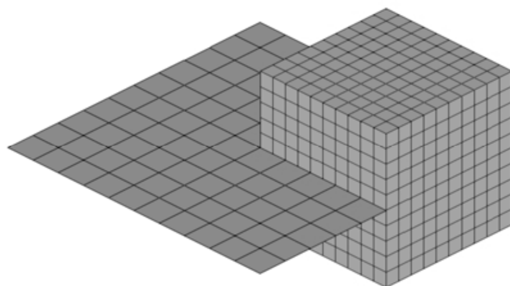


图 4−41　网格模型

STEP 02 延伸 2D 网格

延伸 2D 网格，新生成的 2D 网格空间位于 3D 网格的内部，如图 4−42 所示。

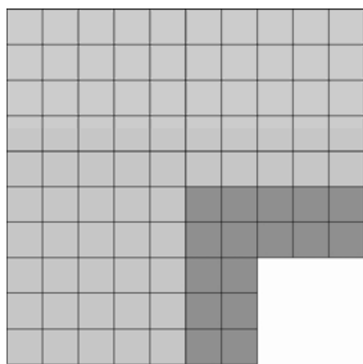


图 4−42　延伸 2D 网格

上图中深色网格为新生成的网格。创建 2D 网格的方法是选取连接区的部分实体单元，然后找到外表面 2D 单元。

STEP 03 合并节点

（1）单击 Tool→faces。

（2）选中所有网格，单击 preview equiv，如图 4−43 所示。

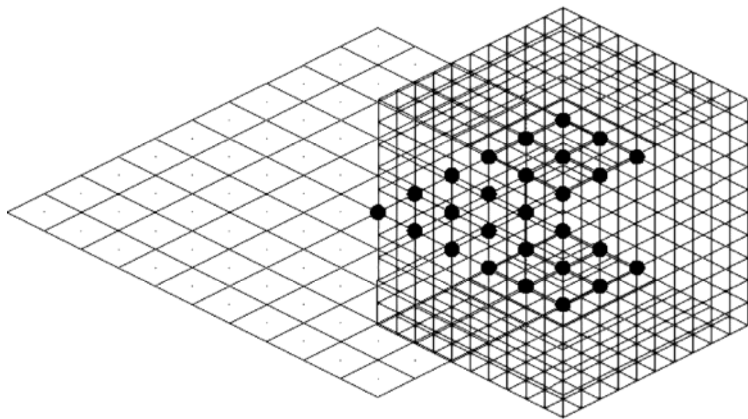


图 4−43　将被合并的节点

（3）单击 equivalence 合并节点，即完成 2D 与 3D 单元的连接。

4.4　本章小结

线性屈曲本质上是特征值问题。求解的方法和模态分析类似，都使用 Lanczos 方法求解方程的特征值。在一些易屈曲的典型结构（如飞机的蒙皮、大型钢结构的梁）上，当结构发生屈曲的时候往往应力水平还很低，甚至只有屈服强度的 1/10，所以屈曲有时会导致严重后果。

使用软件计算线性屈曲的时候有一些限制，比如结构必须在线弹性范围内，结构不发生大变形等。为了使线性屈曲分析有较高的精度，模型的网格应当保证发生屈曲部分的一个屈曲模态振型内至少有 5 个单元，否则无法准确表达屈曲变形。线性屈曲通常得到的是全局稳定性，但是工程中还存在大量的局部稳定性，两者的处理方法完全不同，所以使用线性方法不发生屈曲并不能保证机构就是稳定的。

如果结构是有预载荷的，那么在屈曲分析中也需要考虑预载荷，否则计算结果可能会出现较大误差。这时可以选择建立预应力屈曲分析工况以得到更好的结果。

第 5 章



RADIOSS 惯性释放分析

假设被分析对象不包含任何的机构，也不能有任何的刚体位移，如果这两种情况中的任何一种情况发生则将导致刚度矩阵奇异，从而无法使用传统的静力分析方法求解。惯性释放允许对无约束结构进行分析。惯性释放针对的分析类型既可以是静力学问题也可以是频率响应分析等动力学问题。典型的应用是飞行中的飞机、汽车悬架和空间的卫星等，这些对象的特点是它们都处于静力平衡状态或者匀加速状态，即它们的相对位移和应力状态都是稳定的。惯性释放分析的应用范围还包括已经从多体动力学软件得到各连接部位的载荷，但找不到合适的约束点进行约束的各种静力学分析。

本章重点知识

5.1　惯性释放分析简介
5.2　惯性释放分析实例
5.3　RBE2 和 RBE3 介绍
5.4　本章小结

5.1 惯性释放分析简介

惯性释放分析的外载荷由一系列平动和转动加速度平衡。这些加速度组成体载荷，分布在整个结构上。这些载荷的矢量和刚好使作用在结构上的总载荷为 0。这就为分析提供了一种稳态的应力和变形，相当于物体在这些载荷作用下做自由匀加速运动。边界条件只是为了去掉刚体运动而施加。因为外部载荷由加速度载荷平衡，所以在这些边界约束点的反力都是 0（相当于没有施加约束的效果），该计算过程由系统自动完成。

RADIOSS 惯性释放可用于线性静态分析、非线性 gap 分析、模态频率响应分析（使用残余矢量）和瞬态响应分析（使用残余矢量）。使用惯性释放分析的静态分析工况不能被线性屈曲分析引用。另外，惯性释放对模态分析没有意义。

虽然惯性释放分析内部的处理过程比较复杂，但用户需要进行的设置却是比较简单的。RADIOSS Bulk Data 中有两种不同的方法可以进行惯性释放分析：设置 PARAM，INREL，−1 时，可以进行手工惯性释放，此时需要手动指定虚拟约束 SUPPORTi；设置 PARAM，INREL，−2 时，可以进行自动惯性释放，此时由系统自动施加虚拟约束。一般系统会将平衡点设定在结构的中心附近的位置。

使用 PARAM，INREL，−2 进行惯性释放分析有以下好处。

（1）可以为无约束结构自动添加虚拟支撑去除 6 个刚体自由度。

（2）得到的位移结果具有一致性。

（3）对于难以确定支撑位置的结构，可以得到更精确的位移和应力结果。

与 INREL = −1 不同，使用 Inrel = −2 时实际上没有为结构施加任何实际支撑，所以也就没有强制位移零点。

使用惯性释放分析的注意事项如下。

（1）用于惯性释放分析的模型应该具有质量和惯量。通常可以在材料卡片中设置密度项获得。对于一维单元（如 BAR 单元），在绕轴转动方向上没有惯量，这时可以使用附加的 CONM2 单元模拟惯量。BEAM 单元本身可以赋惯量，所以不存在这个问题。

（2）INREL = −2 推荐用于刚好具有 6 个刚体自由度的无约束结构。注意，这时不允许再添加任何额外的 SUPORTi 项。

（3）如果结构是部分约束的，也就是刚体自由度<6，这时推荐使用 INREL = −1，并使用 SUPORTi 去除其余的刚体自由度。

（4）对于具有 6 个以上刚体位移的结构不推荐使用惯性释放分析，这时如果使用 INREL = −1 将出错，因为 INREL = −1 时最多指定 6 个虚拟约束。使用 INREL = −2 也可能会出错或得到不可靠的结果。

（5）对于具有局部无质量机构的问题，Inrel = −2 可以给出有意义的结果，但是需要在计算完后由用户检查结果是否可靠。

（6）当使用 INREL = −1 进行惯性释放分析时，虚拟约束选取的点应该可以给结构以良好的支撑。如果结构上没有合适的点可以考虑在空间上选取这样的点，然后使用 RBE3 和结构上的多个点相连。注意，由于不能直接对 RBE3 的从节点施加虚拟约束，所以需要先使用 RBE3 单元的 UM 项转移从自由度。UM 使用方法见本章 5.3 节。也可以使用 RBE2 进行连

接，这时可以直接在中间节点上施加虚拟约束，其缺点是会对连接的局部增加额外的刚度。

（7）如果希望自己指定一个位移的零点，应该使用 INREL = −1 进行惯性释放分析。

5.2 惯性释放分析实例

本例将介绍使用 RADIOSS 做惯性释放分析的步骤。工况为一个简化的卫星模型承受惯性载荷，分析的目的是验证卫星结构能否承受惯性载荷而不发生破坏。卫星结构模型，如图 5−1 所示。

设计准则：最大位移<500mm，Von Mises 应力<70MPa（铝）。

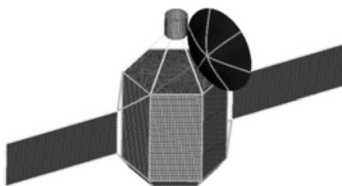


图 5−1 卫星结构模型

STEP 01 启动 HyperMesh，加载 RADIOSSBulkData 用户模板并打开 satellite.hm 文件

该文件已经包含了单元、部件、属性和材料特性。

STEP 02 创建载荷集

按照下面的步骤创建 4 个载荷集（FictitiousSupport、GZ、GX 和 GY），并为每个载荷集分配一种颜色。

（1）在 Model Browser 视图窗口的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create 选项，然后选择 Load Collector，在 loadcol name=文本框中输入 FicitiousSupport，并选择一种颜色。

（2）单击 card image=选择 no card image。

单击 create，创建一个名为 FicitiousSupport 的载荷集，如图 5−2 所示。



图 5−2 创建载荷集

（3）采用同样的方法创建名为 GZ、GX 和 GY 的载荷集。

（4）创建名为 SUM 的 Load Collector，选择 card image 为 LOAD。这个卡片用来组合多个已经创建好的载荷集。单击 creat/edit，在 LOAD_Num_Set=文本框中输入 3。单击 S1（1）、S1（2）和 S1（3）分别输入 1，然后单击 L1（1）、L1（2）和 L1（3）分别选择已经建立好的载荷集 GZ、GX 和 GY。参数设置如图 5−3 所示，单击 return。



图 5−3 创建 LOAD 卡片

STEP 03 添加虚拟约束

（1）在 Model Browser 窗口中展开 Load Collector，用鼠标右键单击 FictitiousSupport，在弹出的快捷菜单中选择 Make Current，如图 5−4 所示。

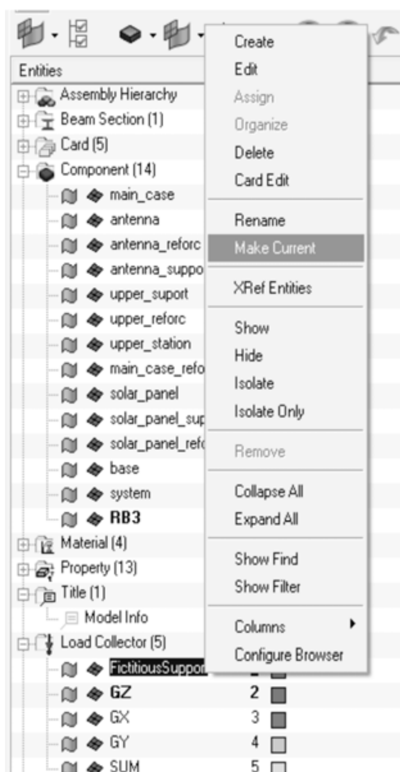


图 5−4 设置当前载荷集

（2）在面板区的 Analysis 面板中，选择 Constraints。

（3）单击 nodes 选择 by id，输入 8545。单击右下方的 load types=，选择 SUPORT1。选中 dof2 复选框，然后单击 create，为 8545 节点建立 dof2 自由度上的虚拟约束，如图 5−5 所示。

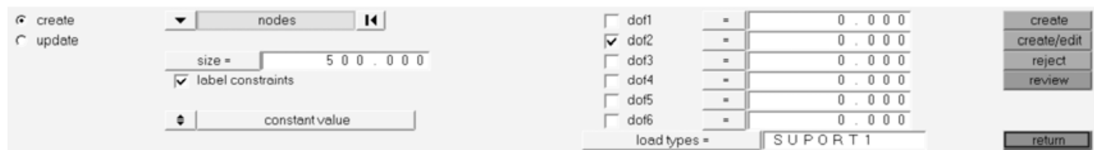


图 5−5 创建虚拟约束（一）

（4）重复步骤（3），为节点 10575 建立 dof1 和 dof2 上的虚拟约束，为节点 10532 建立 dof1、dof2 和 dof3 上的虚拟约束，如图 5−6 所示。

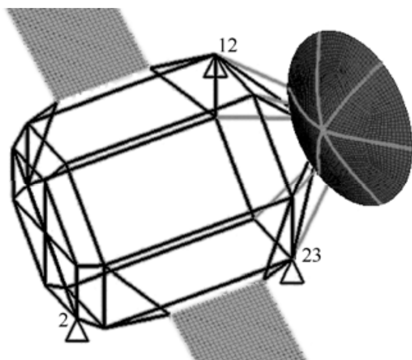


图 5–6　创建虚拟约束（二）

STEP 04 施加等效静态荷载

（1）在 Model Browser 窗口中展开 Load Collector，用鼠标右键单击 GZ，在弹出的快捷菜单中选择 Make Current。

（2）在面板区的 Analysis 面板中，选择 FORCE。

（3）单击 nodes 在扩展面板中选择 by id，输入 18933。单击 magnitude 下拉列表，选择 z-axis，指定力的方向。在 magnitude 中输入−61800，单击 create。

（4）重复步骤（1）～（3），依次将 GX 和 GY 荷载集置为当前并在节点 18933 上施加 x 方向和 y 方向的力，大小均为−92700。

STEP 05 定义参数 INREL

（1）选择 Analysis→control cards。

（2）单击 next，选择 PARAM 卡片。单击左侧的滚动条，选中 INREL 复选框。单击上部 INREL_V1 选择−1。

STEP 06 创建载荷工况

（1）选择 Analysis 中的 Loadstep 面板。

（2）在 Name=文本框中输入 GZ。

（3）设置 Type 选项为 linear static。

（4）选中 SUPORT1 复选框，在右侧会出现一个文本框。

（5）单击该文本框，在载荷集列表中选择 FictitiousSupport。

（6）选中 LOAD 复选框，采用与步骤（5）相同的方法选择 GZ 集。

（7）单击 create。这样就创建了一个名为 GZ 的 RADIOSS 线性静力分析载荷工况。该载荷工况包含虚拟约束 FictitiousSupport 和 GZ 荷载集中的力，如图 5–7 所示。

（8）重复步骤（2）～（7），分别建立名为 GY、GX 和 SUM 的工况。SUPORT1 均选择

Fictitious Support。LOAD 分别选择 GY、GX 和 SUM 荷载集。

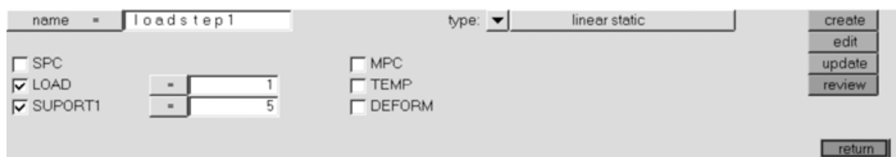


图 5–7　创建线性静态分析载荷步

STEP 07 运行惯性释放分析

（1）进入 Analysis 中的 RADIOSS 面板。

（2）单击 input file 旁边的 save as，出现 save file 窗口。

（3）选择 RADIOSS 结果文件的保存路径，并为文件命名（如 satellite.fem），然后单击 Save。

（4）设置 export options 为 all，run options 为 analysis，memory options 为 memory default，然后单击 RADIOSS 按钮启动分析计算。

提示：如果模型较大，则可以先将 run options 设置为 analysis 检查模型并估计内存的需求量；如果有足够的物理内存可用，则可以使用-core in 选项加速求解。具体的选项可以参考第一章的求解选项部分。

STEP 08 查看分析结果

（1）在 RADIOSS 面板中单击 HyperView 按钮，启动 HyperView 并且加载包含模型和结果信息的 satellite.h3d 文件。

（2）在左侧视图窗口中单击 Load case view 按钮，在载荷下拉列表中选择 SUBCASE 1（GZ），在下面的下拉列表中选择 Static Analysis 选项，如图 5–8 所示。

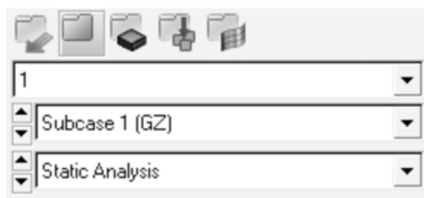


图 5–8　选择结果工况

（3）单击 Graphic 工具栏中的 Contour 按钮。

（4）在 Result type 中选择 Displacement（v）选项，在 sub type 中选择 Mag 选项，如图 5–9 所示。

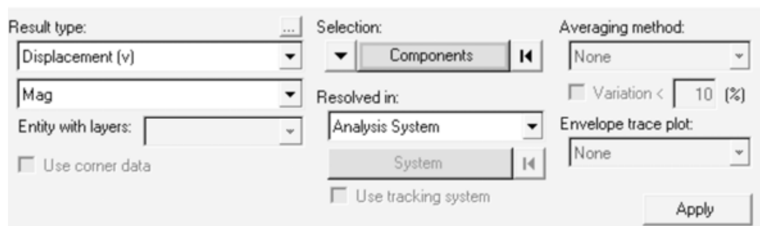


图 5–9　选择位移结果

（5）单击 Apply 显示位移云图，如图 5-10 所示。

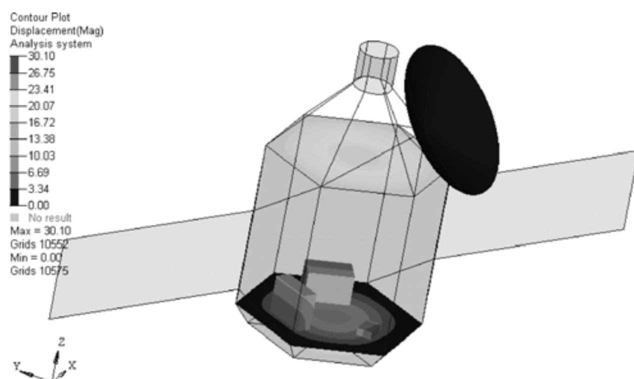


图 5-10　工况 1 下的位移云图

（6）在 Result type 中选择 Element Stresses（2D and 3D）选项，在 sub type 中选择 Von Mises 选项，在 Averaging method 中选择 Simple。单击 Apply 显示 Von Mises 应力云图，如图 5-11 所示。

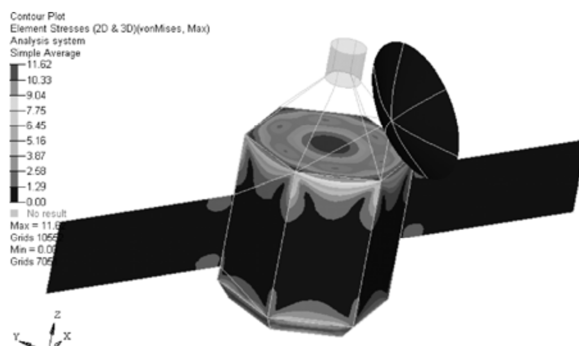


图 5-11　工况 1 下的 Von Mises 云图

重复步骤（2）～（6），分别选择工况 GZ、GY、GX 和 SUM 可以得到 4 种工况下的位移和 Von Mises 云图，如图 5-12 和图 5-13 所示。

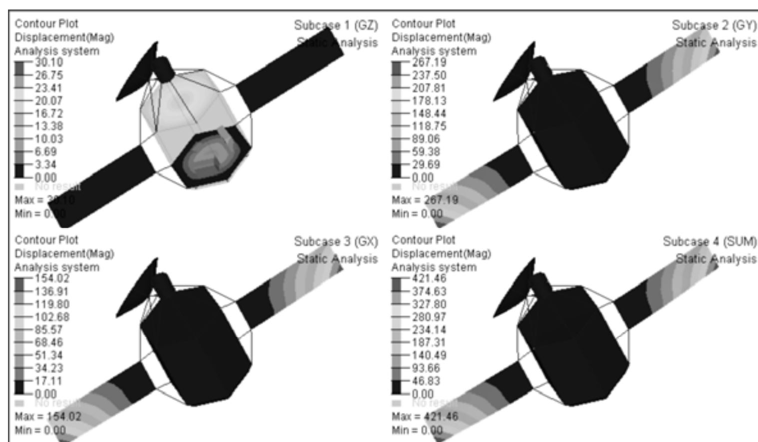


图 5-12　4 种工况下的位移云图

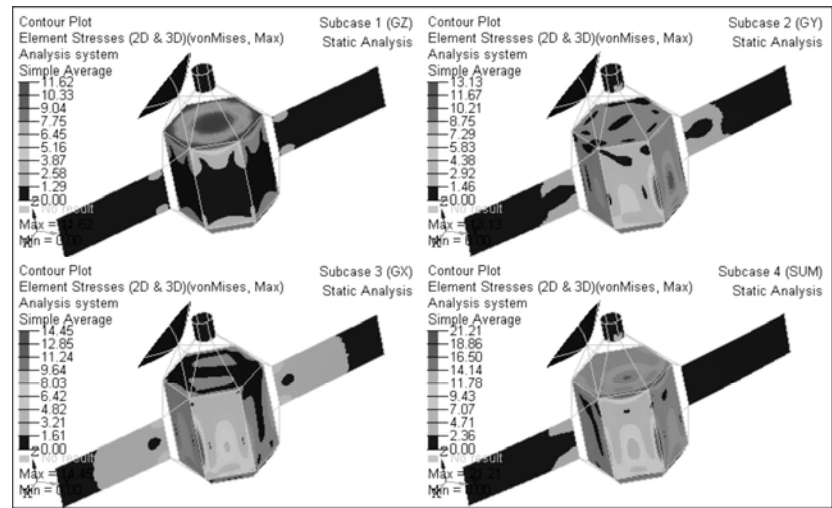


图 5-13　4 种工况下的 Von Mises 应力云图

从图中可以看出，4 种工况下最大位移为 421.46mm，最大 Von Mises 应力为 21.21MPa，均未超出设计准则，可见结构满足设计要求。

5.3　RBE2 和 RBE3 介绍

RBE2 和 RBE3 经常用于零件连接、载荷加载或者施加约束，还可以用于模拟大质量/基础驱动式连接。

RBE2 用于定义一个刚性单元，单元的独立自由度由一个单独的节点指定，而非独立自由度则可以由任意多个节点指定。有时 RBE2 又被称为“蜘蛛网式”或“车轮式”连接。

5.3.1　RBE2 单元

RBE2 卡片格式如表 5-1 所示。

表 5-1　RBE2 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
RBE2	EID	GN	CM	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	
	GM6	GM7	GM8	-etc.-					

RBE2 卡片示例如表 5-2 所示。

表 5-2　RBE2 卡片示例

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
RBE2	9	8	12	10	12	14	15	16	
	20								

卡片格式中的各项参数说明如表 5-3 所示。

表 5-3　RBE2 卡片参数说明

项	内　　容
EID	唯一的单元 ID 号
GN	决定刚性单元 6 个独立自由度的节点（整型> 0）
CM	在总体坐标系下，GM1 和 GM2 等节点的非独立自由度分量号。可以输入 1、2、3、4、5 和 6 这 6 个数字，中间不能有空格（整型> 0）
GM1、GM2、etc.	选取的非独立自由度节点

（1）所有 GMi 节点的由 CM 所指明的自由度均是非独立的。

（2）以下条件下不能指定为非独立自由度：

1）包括单点约束（SPC 或者 SPC1）。

2）在其他 RBAR、RBE1、RBE2、RBE3 和 RROD 卡片中已指定为非独立自由度的。

3）在 subcase 的 MPC 项中已经指定为非独立自由度的。

（3）单元的 ID 号必须唯一。

在 HyperMesh 中此卡片为一个 rigid 或者 rigidlink element。

RBE2 将两个不同零件“焊接”到一起（连接 6 个自由度）或者将两个不同零件“螺接”（铰接）到一起（连接 3 个自由度）。表 5-4 所示是一个典型的 RBE2 卡片。

表 5-4　典型的 RBE2 卡片

RBE2	1	1000	123456	1	2	3	4	

如图 5-14 所示的节点 1～4 之间没有相对位移。

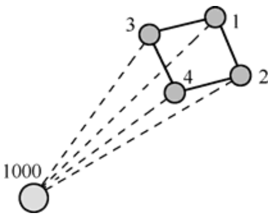


图 5-14　RBE2 单元示例

5.3.2 RBE3 单元

RBE3 单元中从节点的运动是一组主节点运动的加权平均，不是真正的刚性单元。如果使用正确，则不会使结构刚度增加。和 RBE2 相反，RBE3 单元中通常中心节点为从自由度，从自由度上不能施加单点约束 SPC，也不能是 OMITted、SUPORTed 或从属于其他 RBE/MPC 单元。典型的 RBE3 单元如图 5-15 所示。

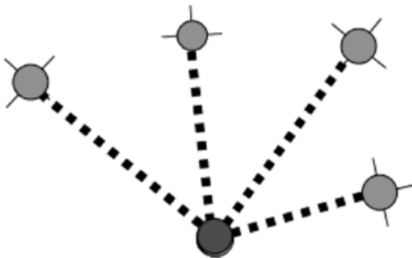


图 5-15　RBE3 单元示例

RBE3 单元的卡片格式如表 5-5 所示。

表 5-5 RBE3 单元的卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
RBE3	EID	blank	REFGRID	REFC	WT1	C1	G1,1	G1,2	
	G1,3	WT2	C2	G2,1	G2,2	etc.	WT3	C3	
	G3,1	G3,2	etc.	WT4	C4	G4,1	G4,2	etc.	
	"UM"	GM1	CM1	GM2	CM2	GM3	CM3	blank	
	blank	GM4	CM4	GM5	CM5	etc.		blank	

RBE3 单元的示例如表 5-6 所示。

表 5-6 RBE3 单元示例

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
RBE3	14		100	1234	1.0	123	1	3	
	5	4.7	1	2	4	6	5.2	2	
	7	8	9	5.1	1	15	16		
	UM	100	14	5	3	7	2		

RBE3 卡片格式中的各个参数说明如表 5-7 所示。

表 5-7 RBE3 卡片中的各个参数说明

项	内容
EID	唯一的单元 ID 号
REFGRID	参考节点。此节点为非独立节点。改变 UM 标示重新定义非独立的自由度可以将一部分或者所有的非独立自由度变为独立自由度（整型> 0）
REFC	指定用以计算参考节点运动的运动分量。可以输入 1、2、3、4、5 和 6 这 6 个数字，中间不能有空格（整型> 0）
WTi	所选节点 Gi,j 运动分量的权重系数（实数）
Ci	节点 Gi,j 权重系数为 WTi 的运动分量。可以输入 1、2、3、4、5 和 6 这 6 个数字，中间不能有空格（整型> 0）
Gi,j	运动分量为 Ci，权重系数为 WTi 的节点（整型> 0）
UM	重新定义非独立自由度的标示。默认为在 REFC 中设置的所有非独立自由度
GMi	重新定义非独立自由度的节点（Integer > 0）
CMi	节点 GMi 重新定义的非独立自由度。可以输入 1、2、3、4、5 和 6 这 6 个数字，中间不能有空格（整型> 0）

（1）在大多数应用中，Ci 只选择平动分量 1、2、3。在 Gi,j 共线的情况中，Ci 可以增加一个转动分量，用以稳定此单元的刚体模式。

（2）一个 Gi,j 序列结束后可以有空格。

（3）除了需要重新定义 REFC 中设定的非独立自由度的情况外，将会使用默认值来确定非独立自由度。如果没有使用默认值指定非独立自由度，那么其自由度总数（单元非独立自由度的总数）必须等于 REFC 中指定的自由度分量的数目（在本例中为 4 个），其指定的自由度必须是 REFC 以及 Gi,j 和 Ci 指定的自由度分量的子集。

约束方程(RM) {um} + (Rn) {un} = 0 中系数矩阵(Rm)必须是非奇异的，um 为非独立自

由度集，un 为独立自由度集。

（4）一个刚性单元的非独立自由度不能被指定为其他刚性单元的非独立自由度，同样也不能被用于多点约束以及 SPC 中。

（5）为了使计算结果与模型的单位不相关联，在 5.0 版本中，调整了 RBE3 单元的计算方法。旋转自由度的权重按比例增大，比例值为参考节点与独立节点距离平均值的平方。只有在 RBE3 单元中独立节点存在旋转自由度时，才会使用这种算法。可用下述语句使用先前的 RBE3 算法：debug,OLDRBE3,1.0。

（6）此卡片在 HyperMesh 中为一个 RBE3。

RBE3 卡片中的 UM 域可以用来将从自由度从节点中移除，可以将 RBE3 单元中的节点自由度关系写成方程，如式（5–1）节点 99 和节点 1、2、3 之间的关系。将方程右边的 3 乘到左边可以得到式（5–2），移项后可以得到式（5–3），也就是把从自由度转移到了 U1。

$$U99=(U1+U2+U3)/3 \tag{5–1}$$

$$3\times U99=U1+U2+U3 \tag{5–2}$$

$$-U1=+U2+U3-3\times U99 \tag{5–3}$$

施加在 RBE3 单元从节点上的力/力矩，会按照经典的螺栓分析方式分配到各个主节点上，载荷分配按照以下两个步骤进行。

步骤 1：如图 5–16 所示，将从节点上的力/力矩转换为主节点加权重心处的力/力矩，计算公式见式（5–4）和式（5–5）。

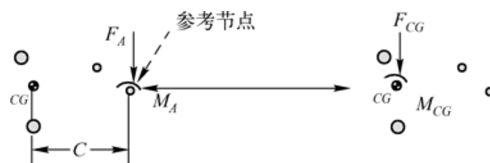


图 5–16　RBE3 单元的载荷分配方式步骤 1

$$F_{CG}=F_A \tag{5–4}$$

$$M_{CG}=M_A+F_A\times e \tag{5–5}$$

步骤 2：如图 5–17 所示，将位于加权重心的载荷按照加权值分配给主节点。

位于加权重心的力，按照加权因子 W_i 分配给主节点。相对加权重心的力矩，按照加权因子 W_i 映射为主节点上的等效力偶。

各主节点的合力为来自加权重心的力的和，如式（5–6）。

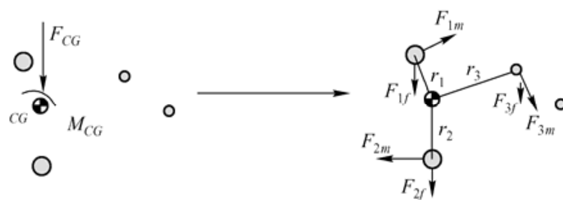


图 5–17　RBE3 单元的载荷分配方式步骤 2

$$F_{if}=F_{CG}\left(W_i/\sum W_i\right) \tag{5–6}$$

加上来自相对加权重心的力矩的力，如式（5–7）。

$$F_{im}=\left(M_{CG}W_i r_i/\left(W_1 r_{12}+W_2 r_{22}+W_3 r_{32}\right)\right) \tag{5–7}$$

从节点上的质量按照与从节点上力相同的方式分配到主节点上：

- 质量按照权因子分配给主节点。
- 由于从节点的运动造成的质量惯性力传送给主节点。
- 从节点惯性力分配给主节点的方式与从节点上静力的分配方式相同。

如图 5−18 所示，为了在 RBE3 的中间节点施加约束（从而使模态分析没有刚体模态）需要设置 UM 选项使中间节点具有 6 个自由度。

由于只有一个 RBE3 需要设置，所以可以进行手工设置，步骤如下。

（1）打开 um.hm 模型，如图 5−18 所示。该模型已经根据模态分析进行了设置。

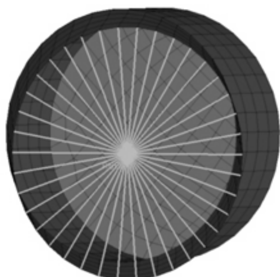


图 5−18　模型

（2）单击 card edit 按钮查看 RBE3 单元结果，如图 5−19 所示。

G G G G G G G G
2313 2312 2311 2310 2309 2308 2307 2306
G G G G G G G G
2305 2304 2303 2302 2301 2300 2299 2298
G G G G
2297 2296 2295 2294
UM

图 5−19　原始的 RBE3 卡片

（3）选中 UM 复选框，设置如图 5−20 所示。

2313 2312 2311 2310 2309 2308 2307 2306
G G G G G G G G
2305 2304 2303 2302 2301 2300 2299 2298
G G G G
2297 2296 2295 2294
GM(1) CM(1) GM(2) CM(2) GM(3) CM(3)
UM 2331 123 2319 23 2307 3
UM
Number_of_UM_Grids = 3

图 5−20　编辑后的 RBE3 卡片

这时就可以在 RBE 的中间节点上施加 6 个自由度约束然后进行模态分析了（步骤略）。

5.4　本章小结

惯性释放技术是对静力分析的一个重要延伸。本章介绍了惯性释放的基本理论和软件操作方法。通过使用惯性释放技术，可以为完全没有约束或者部分没有约束的模型进行求解。另外，还可以通过使用惯性释放技术检查静力分析问题模型连接是否正确。需要注意的是，如果在惯性释放中手工添加虚拟约束，那么定义的这些虚拟约束必须刚好把结果的刚体位移去掉；否则会出现求解错误。如果用户希望自己指定变形的零点，那么需要使用手工惯性释放将虚拟约束施加在希望的零点。

第 6 章

模态分析



结构在特定频率的振动激励作用下产生的变形形式称为模态振型。每一阶模态振型与一个特定的自然频率相关联。特征频率、基础频率、共振频率和正则频率等都是自然频率的同义词。自然频率和振型是结构本身的物理属性，由结构特性和边界条件决定。如果结构特性变化（如弹性模量变化），则频率也会发生相应变化，但是振型未必变化。如果边界条件变化，则频率和振型同时都会发生变化。如果不考虑阻尼，则得到的特征值都是实数。如果考虑阻尼，则特征值将是复数。

计算自然模态的作用如下。

（1）评估被支撑部件与支撑结构的动态交互作用（如是否共振等）。

（2）其他后续的动力学分析（如频率响应分析、随机响应分析、瞬态响应分析和响应谱分析等）可以在模态分析结果的基础上进行。模态法频率响应分析和模态法瞬态响应分析可以直接读取模态分析的模态频率和振型。模态结果还有助于确定瞬态响应分析恰当地分析时间步长和频率响应分析的待求解频率点。

（3）模态分析结果可以用于指导试验。例如，模态分析结果可以帮助确定加速度计的最佳安装位置。此外，模态分析结果还可用于与试验结果的对标。

本章重点知识

6.1　模态分析基本理论
6.2　模态分析实例
6.3　相关卡片
6.4　有限元分析中的单位制
6.5　模态加速技术
6.6　本章小结

6.1 模态分析基本理论

6.1.1 实特征值分析

自由振动结构的平衡方程表现为式（6–1）所示的特征值问题：

$$(K-\lambda M)X=0 \tag{6–1}$$

其中，K 是结构刚度矩阵，M 是质量矩阵。实模态分析通常不考虑阻尼效应。求解特征值问题可以得到 n 个特征值λ_i（n 是自由度数）。向量 x 是与特征值对应的特征向量。这些特征向量构成一个线性空间的一组正交基。一个有限元模型的任意变形都可以由这组基的线性叠加来表达。

特征值问题使用 Lanczos 方法求解。通常只计算最低阶的一些特征值而并不需要求解所有特征值。

得到λ_i后可以根据式（6–2）求得自然频率 f_i：

$$f_i=\frac{\sqrt{\lambda_i}}{2\pi} \tag{6–2}$$

进行模态分析需要在 Bulk Data 段使用EIGRL卡片定义需要提取的模态阶数。EIGRL 卡片需要被 SUBCASE 段的 METHOD 引用。

RADIOSS 和 OptiStruct 的 Lanczos 特征值求解器提供了两种不同的方法求解特征值。如果在 EIGRL 卡片中没有定义上限且待求的特征值阶数少于 50，系统会自动选择速度较快的方法。模态分析可以不定义 SPC 边界条件（当然，如果实际中有约束，那么就按照实际情况定义 SPC 约束）。如果没有边界条件，则模型的每个刚体运动自由度上会有一个大小为 0 特征值。

在模态分析的同时，还可以进行残余向量的计算。残余向量是根据特征向量正交规范化的静态位移，用于外部的频率响应分析。为了得到该输出，用户必须使用 USET 和 USET1 定义自由度。这些自由度在单位载荷法计算残余向量时用于定义载荷。计算残余向量需要在模态 SUBCASE 中定义 RESVEC＝YES。边界条件可以使用 SPC 定义或使用惯性释放分析。

6.1.2 复特征值分析

实特征值分析用于计算结构的实模态，而复特征值分析则用于计算结构的复模态。复模态包含实部和虚部，实部代表该阶模态的阻尼，虚部代表结构的圆频率。如果实部为负，则说明该阶模态是稳定的；如果实部为正，则说明该阶模态是不稳定的。复特征值分析通常用于确定当存在特定的物理行为作用使矩阵呈现不对称性的情况下结构的稳定性。同时，复特征值分析还可用于计算带阻尼结构的模态。

复特征值分析的控制方程见式（6–3）：

$$\left\{\rho^2 M+pB+\left(K+\mathrm{i}gK+\mathrm{i}\sum G_E+\alpha_f K_f\right)\right\}\{\phi\}=0 \tag{6–3}$$

其中，K 为结构刚度矩阵，G 为全局结构阻尼矩阵，M 为质量矩阵，K_f为通过直接矩阵输入

得到的额外刚度矩阵，G_E 为单元结构阻尼矩阵，α_f 为额外刚度矩阵的系数，B 为粘性阻尼矩阵。

求解复特征值问题得到复特征值 $p=\alpha+\beta i$ 和复模态振型 ϕ。如果复模态含有正的实部，则认为该模态是不稳定的。不稳定模态通常成对出现（共轭复数）。

圆频率 f 可以通过式（6-4）计算得到：

$$f=\frac{\beta}{2\pi} \tag{6-4}$$

阻尼系数可以通过式（6-5）得到：

$$g=-\frac{2\alpha}{|\beta|} \tag{6-5}$$

该项对应于复特征值的实部。如果模态含有负的阻尼系数且实部为正时，则该阶模态是不稳定的模态。

如果问题的规模较大，直接求解上式计算复特征值计算量较大。所以，通常使用模态法进行复特征值问题的求解。

首先，通过模态分析得到实模态。然后，在通过实模态投影生成的子空间上形成复特征值问题。最后，使用 Hessenberg 缩减方法提取复模态。

进行复特征值分析需要在 Bulk Data 段同时定义 EIGRL 和 EIGC 卡片。它们分别规定了实模态和复模态的提取阶数。EIGRL 卡片必须被 SUBCASE 段的 METHOD 引用。EIGC 卡片必须被 SUBCASE 段的 CMETHOD 引用。

复特征值分析通常包含一个表示物理不稳定源的非对称矩阵。外部矩阵需要通过 Bulk Data 段的 DMIG 卡片提供并被 SUBCASE 段的 K2PP 引用。用户可以通过 PARAM 和 FRIC 定义一个外部矩阵的系数，系数的默认值是 1.0。

6.2　模态分析实例

6.2.1　支架的模态分析

下面将学习如何对模态分析进行设置。本例的模型如图 6-1 所示。

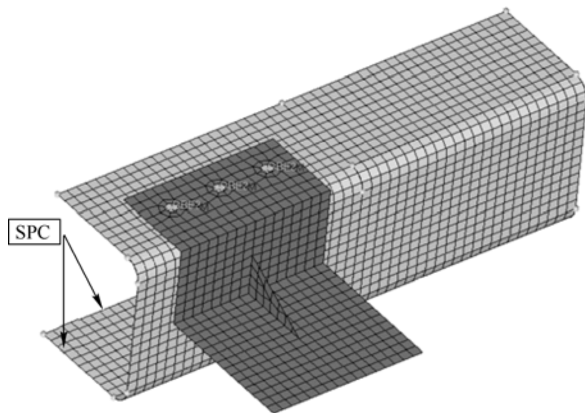


图 6-1　分析模型

STEP 01 打开模型文件 channel_brkt_modal.hm 并选择 RADIOSS（Bulk Data）用户模板

（1）打开 HyperMesh，在 UserProfiles 对话框中选择 RADIOSS。
（2）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。
（3）在 File 下拉菜单中单击 Open，弹出 Open model 窗口。
（4）在光盘中找到 channel_brkt_model.hm 文件并打开。

STEP 02 检查并编辑材料

（1）在 model browser 中，展开 Material 可以看到模型中有两种材料。
（2）用鼠标右键单击 aluminum，在弹出的快捷菜单中选择 Card Edit。
（3）在 Card Edit 窗口中，单击[RHO]并且在其下的文本框中输入 2.7e-9。
（4）单击 return，关闭 Card Edit 窗口。
（5）重复步骤（1）～（4），在 steel 中单击[RHO]并且输入 7.9e-9。

STEP 03 建立一个名为 modal 的载荷集

该步可以在 Load Collectors 面板的 create 子面板中完成。EIGRL Load Collector 里需要建立一个卡片信息，而约束 Load Collector 中不需要卡片信息。
（1）在工具栏中单击 Load Collectors 按钮 进入 Load Collectors 面板。
（2）在面板左边选择 create 子面板。
（3）单击 loadcol name = 输入 modal。
（4）单击 card image =选择 EIGRL。
（5）单击 create/edit。
（6）设定 ND= 为 10。这里的 ND 指定了需要提取的模态阶数。
（7）单击 return。

STEP 04 建立名为 constraints 的载荷集

（1）单击 loadcol name = 输入 constraints。
（2）切换 card image = 至 no card image。
（3）单击 create 创建载荷集 constraints。
（4）单击 return 退出面板。

STEP 05 施加约束（SPC）到 channel 上

显示组件的几何并且设置视图到 iso1，接着设置 HyperMesh 约束类型为 SPC。

（1）在 Model Browser 中展开 Component 文件夹。
（2）在 channel 边上单击“几何”按钮显示几何。
（3）在工具栏上单击 Isometric View 按钮。
在 channel 的底面沿着周长边上的节点创建 SPC 约束，如图 6-2 所示。

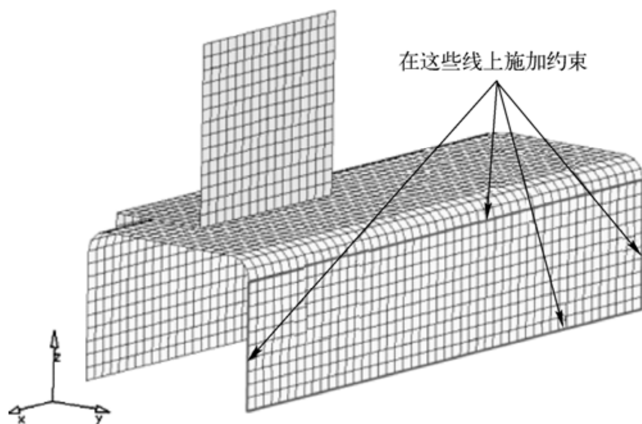


图 6-2　在 channel 上施加约束

（4）单击 BCs→Create→Constraints 打开 Constraints 面板，切换 entity 类型为 lines。
（5）选择 channel 底面周围的 6 条边。
（6）激活 1～6 自由度（dof），单击 create，然后单击 return 退出面板。

STEP 06 映射几何线上的约束（RADIOSS SPC）到相关联的节点上

这一步使用 load on geom 面板。
（1）进入 Analysis 中的 load on geom 面板。
（2）选择 loadcols，选择 constraints 载荷集，单击 select 完成选择。
（3）单击 map loads。这样就在和几何线关联的每个节点上都施加了约束。
（4）单击 return 退出面板。

STEP 07 定义模态分析载荷工况（也叫载荷步 loadsteps）

在这一步骤中使用 loadsteps 面板。定义工况包含 constraints 和 modal 载荷集。
（1）单击 Setup→Create→LoadSteps 打开 LoadSteps 面板。
（2）在 name=文本框中输入 normal_modes。
（3）将 type 改变为 normal modes。
（4）选中 METHOD（STRUCT），单击 = 后边的区域并选择 modal。
（5）选中 SPC，单击 = 后边的区域并选择 constraints。
（6）单击 create，然后单击 return 退出面板。

STEP 08 定义 RADIOSS 输出的结果文件格式

单击 Control Cards → GLOBLE_OUTPUT_REQUEST → OUTPUT，增加 H3D 和 HyperMesh res 格式的输出。

（1）单击 Setup→Create→Control Cards，打开 Control Cards 面板。

（2）选择控制卡片 OUTPUT。注意卡片信息，其中第一行 OUTPUT 的默认设置为 CMF，用于指定 RADIOSS 输出结果至 HyperMesh 命令文件中。

（3）单击 CMF，选择 H3D。

（4）在 number_of_outputs = 中，指定 2。第二个 OUTPUT 行出现在卡片信息中。

（5）再次单击 CMF 并且选择 HM 为第二种输出类型。这次指定 RADIOSS 输出结果为一个 H3D 文件和一个 res 文件，计算结果可以在 HyperView 中查看。

（6）单击 return 返回至 Control Cards 面板。

注意，OUTPUT 按钮是绿色的，这表明卡片将被导出到 RADIOSS 输入文件中。关于 OUTPUT 卡片的详细信息可以在光盘中的 pdf 文件中找到。

（7）单击 return 退出面板。

STEP 09 运行分析并查看结果

（1）单击 Analysis 中的 RADIOSS 面板。

（2）单击 save as，并且输入文件名为 modal_analysis.fem。

（3）单击 RADIOSS 按钮提交作业。

（4）当计算完成之后，可以在 HyperView 中查看模态分析结果。

6.2.2 白车身模态分析

STEP 01 打开 HyperMesh，选择 RADIOSS（Bulk Data）用户模板，并找到模型文件 BIW_RADIOSS_demo.hm

（1）打开 HyperMesh，在 UserProfiles 对话框中选择 RADIOSS。

（2）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

（3）在 File 下拉菜单中单击 Open，弹出 Open model 窗口。

（4）在光盘中找到 BIW_RADIOSS_demo.hm 文件并打开。

STEP 02 建立一个名为 eigrl 的载荷集

（1）在工具栏中单击 Load Collectors 按钮进入 Load Collectors 面板。

（2）在面板左边选中 create 单选按钮，选择 create 子面板。

（3）单击 loadcol name =文本框输入 eigrl。

（4）单击 card image =选择 EIGRL，如图 6-3 所示。

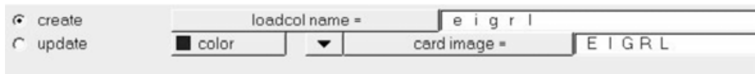


图 6-3　创建 EIGRL 卡片

（5）单击 create/edit。

（6）设定 V2 = 50 提取频率小于 50Hz 的所有模态。这里，由于模型没有约束，所以有 6 阶的刚体模态，而非刚体模态从第 7 阶开始。

（7）单击 return。这样就创建了 eigrl 的载荷集。

STEP 03 定义模态载荷工况

在这一步骤中使用 loadsteps 面板。定义工况包含 eigrl 载荷集。

（1）单击 Setup→Create→LoadSteps，打开 LoadSteps 面板。

（2）在 name=文本框中输入 normal_mode。

（3）将 type 改变为 normal modes。

（4）选中 METHOD（STRUCT），单击出现的=，并选择 eigrl。

（5）单击 create，然后单击 return 退出面板。

STEP 04 提交求解

（1）从 Analysis 页面中进入 RADIOSS 面板。

（2）单击 save as 并且输入文件名为 modal_analysis.fem。

（3）单击 RADIOSS 按钮提交工作。

（4）当计算完成之后，可以在 HyperView 中查看结果。

模型的计算量较大（需要性能较好的计算机求解，如果内存足够大，可以使用-core in 选项加速计算过程），所以我们在光盘中附上了已经计算好的模型结果文件。

STEP 05 查看结果文件

（1）在 HyperView 中，打开模型 H3D 结果文件 BIW_RADIOSS_demo。

（2）在左边任务栏 Results 中，可以观察到求解的 16 阶模态。

（3）选择第 7 阶模态 Mode7，单击工具栏上的 Contour 按钮，单击 Apply。

（4）单击工具栏上的 Deformed 按钮。

（5）在 Deformed shape 中改变 Scale 为 Model percent，Value 值设为 10。这样就将模型变形，根据模型尺寸的 10%进行缩放。

（6）单击 Apply。

提示：模态分析的变形大小的绝对值没有意义，所以可以根据需要进行缩放以方便查看模型的相对变形大小。

（7）单击工具栏上 Set Transient Animation Mode 按钮右边的选项按钮，在弹出的菜单中单击 Set Modal Animation Mode 按钮开始，这样就可以在显示窗口中看到变形动画。

（8）选择感兴趣的频率或者模态阶数，观察变形。

（9）前 4 阶非刚体模态结果如图 6-4 所示。

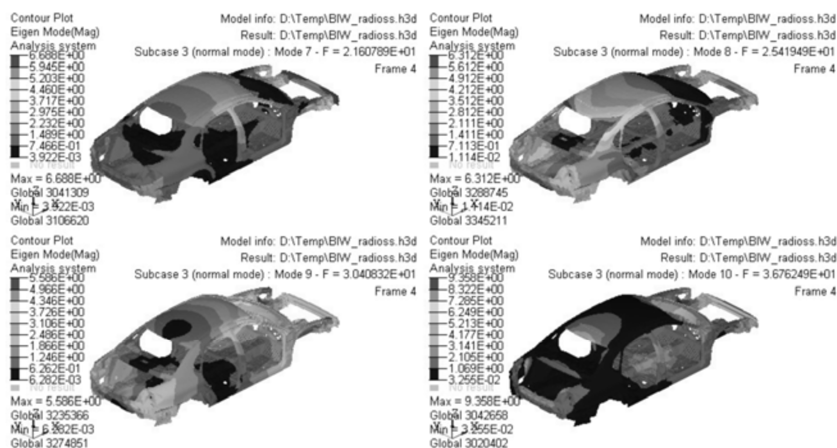


图 6-4　白车身模态分析结果

如果本例中将 EIGRL 卡片改为 EIGRA，则可以使用模态加速技术计算该模态，计算时间可以大大缩短。要使用 EIGRA 卡片需要在 HyperMesh 中打 130 补丁和 RADIOSS 求解器的 220 补丁。使用 EIGRA 得到的计算结果参考本章 6.5 节。

6.2.3 简化的制动系统的复特征值分析

在本例中将分析一个简单的制动系统的模态复特征值问题，考查摩擦效应是否会导致啸声（不稳定模态）。

该制动系统由一个带摩擦面和后板的制动盘和一个接触板组成。用实体单元进行建模。在制动盘和接触板之间用弹簧单元（CELAS1）测量接触力。制动盘和接触板之间的摩擦力和法向接触力正交。表示接触点摩擦力和法向位移关系的刚度矩阵保存在 DMIG.pch 文件中。假设制动盘和接触板在任意时刻都完全接触，制动盘的后板和接触板都固定在地面上。本例使用的模型如图 6-5 所示。

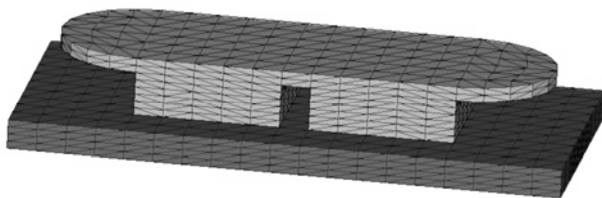


图 6-5　分析模型

STEP 01 打开 HyperMesh，选择 RADIOSS（Bulk Data）用户模板并打开模型

（1）单击工具栏上的模型“导入”按钮。

（2）单击 import 导入模型 brake.fem，按图 6-6 所示进行设置。

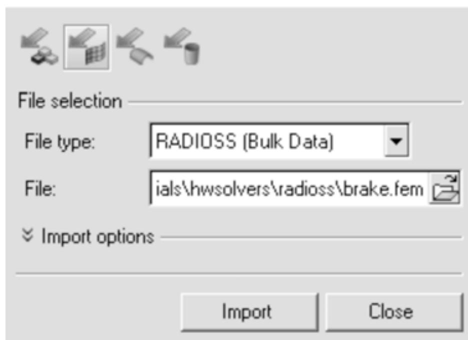


图 6-6　导入有限元模型

STEP 02 创建 EIGRL 和 EIGC 卡片

这一步使用直接法求解计算量较大。本例使用模态法求解复特征值问题。在模态法中，首先通过模态分析计算实模态，然后通过在投影子空间扩展实模态得到复特征值，复空间比实空间要小。在这种方法中需要定义 EIGRL 和 EIGC 卡片。

（1）单击 Load Collectors 按钮。

（2）进入 create 子面板，输入 eigrl 作为 load collector 的名字。

（3）单击 card image =，选择 EIGRL。

（4）单击 creat/edit 编辑 EIGRL 卡片。

（5）单击 [ND] 输入 20，单击 return 回到 create 子面板。使用 20 阶实模态构造复特征值分析缩减空间。

（6）进入 create 子面板，输入 eigc 作为 load collector 的名字。

（7）单击 card image =，选择 EIGC。

（8）单击 creat/edit 编辑 EIGC 卡片。

（9）单击 NORM 选择 MAX，MAX 选项用于归一化特征向量。

（10）单击 [ND] 输入 12，单击两次 return 回到主菜单。

STEP 03 从 DMIG 输入摩擦数据并定义分析参数

（1）单击 Analysis→control cards，选择 INCLUDE_BULK。

（2）输入 include 的文件名 DMIG.pch，然后单击 return 返回 control cards。

（3）单击 K2PP，设置 number_of_k2pps = 1。

（4）在 K2PP=文本框中输入 DMIG 数据项的名字 KF，然后单击 return 返回。

以上操作是从 DMIG.pch 文件提取摩擦因数。

（5）单击 PARAM，选中 G 复选框。

（6）单击[G_V1]输入 0.2 作为结构阻尼系数，然后返回 PARAM 面板。

（7）选中 FRIC 复选框，单击 [VALUE] 输入 0.05。

摩擦因子 0.05 用于缩放 DMIG 项的摩擦因数，单击 return 两次返回。

STEP 04 定义一个复特征值分析的工况

（1）在 Analysis 页面中选择 loadsteps 面板。

（2）单击 type 选择 complex eigen（modal）。

（3）单击 name =，在其后的文本框中输入 complex_eigen。

（4）选中 SPC 复选框，单击=从 load collectors 下拉列表中选择 SPC。

（5）选中 CMETHOD 复选框，单击=从 load collectors 下拉列表中选择 eigc。

（6）选中 METHOD（STRUCT）复选框，单击=从 load collectors 下拉列表中选择 eigrl。

（7）单击 create，然后单击 return 返回 Analysis 页面。

STEP 05 提交求解

（1）从 Analysis 页面进入 RADIOSS 面板。单击 Save as，设置如图 6-7 所示。

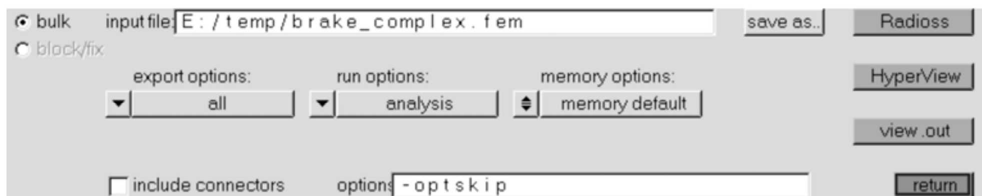


图 6-7　提交作业

（2）单击 Radioss。

STEP 06 查看结果

复特征值分析结构的复模态。特征值可以在 brake_complex.out 文件中找到，复特征向量可以使用 HyperView 查看。

使用文本编辑器打开 brake_complex.out，复模态包含的虚部代表圆频率，实部代表该模态的阻尼。如果实部为负，则代表该阶模态稳定。如果实部为正，则代表该阶模态不稳定。复模态的分析结果如图 6-8 所示。

```
Subcase   Mode  Eigenvalue(R) Eigenvalue(I)  Frequency     Damping
      1      1  -1.189E+04    1.283619E+05   2.042943E+04   1.853242E-01
      1      2  -1.922E+04    1.802433E+05   2.868661E+04   2.132313E-01
      1      3  -3.093E+04    3.207815E+05   5.105395E+04   1.928601E-01
      1      4  -3.331E+04    3.597064E+05   5.724905E+04   1.851855E-01
      1      5  -3.732E+04    3.859599E+05   6.142742E+04   1.933804E-01
      1      6  -5.122E+04    4.575170E+05   7.281610E+04   2.239197E-01
      1      7   3.320E+04    5.012606E+05   7.977811E+04  -1.324546E-01
      1      8  -1.356E+05    5.222452E+05   8.311790E+04   5.193638E-01
      1      9  -4.934E+04    5.313086E+05   8.456039E+04   1.857378E-01
      1     10  -5.338E+04    5.398863E+05   8.592557E+04   1.977311E-01
      1     11   1.179E+03    5.931217E+05   9.439824E+04  -3.975506E-03
      1     12  -1.152E+05    6.140092E+05   9.772260E+04   3.752705E-01
```

图 6-8　复模态分析结果

由图 6-8 可以看到，第 7 阶和第 11 阶模态是发散的，其他模态都是稳定的。可以通过设定参数 PARAM 和 FRIC 为 0.05～0.01 来减小摩擦因数，这样所有的模态就全部都是稳定的了。这也说明摩擦因子在 0.05～0.01 之间有一个稳定门槛。门槛值的确定可以通过反复修改 PARAM 和 FRIC 使该阶模态的阻尼趋于 0 来查找，另外也可以使用 HyperStudy 外部调用 RADIOSS 进行精确查找门槛值。

将 brake_complex.h3d 文件载入 HyperView 查看复特征向量。

6.3　相关卡片

1．EIGRL 卡片

定义使用 Lanczos 法进行实特征值分析（振动或屈曲）的相关数据。

EIGRL 卡片格式如表 6-1 所示。

表 6-1　EIGRL 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
EIGRL	SID	V1	V2	ND	MSGLVL	MAXSET	SHFSCL	NORM	

EIGRL 卡片示例如表 6-2 所示。

表 6-2　EIGRL 卡片示例

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
EIGRL		0.1	3.2	10					

EIGRL 卡片格式中各项的解释如表 6-3 所示。

表 6-3　EIGRL 卡片中各项的解释

项	内　　容
SID	ID 号，无默认值（整型> 0）
V1,V2	对振动分析：感兴趣的频率范围 对屈曲分析：感兴趣的特征值范围 默认值= 空（V1 < V2，实型或空）

（续）

项	内　　容
ND	希望计算的根的个数，无默认值（整型> 0 或空）
MSGLVL	诊断级别。默认值= 0（整型 0～4 或空）
MAXSET	Block 或 set 中的向量个数。默认值= 8（整型 1～16 或空）
SHFSCL	对振动分析：估计第一阶柔性模态 对屈曲分析：估计第一阶特征值 默认值= 空（实型或空）
NORM	特征值归一化方法。如果是 MASS，则特征值将根据广义质量归一化（该选项对线性屈曲分析不可用）。如果是 MAX，则特征值将根据分析的最大位移进行归一化 模态分析默认值=MASS，线性屈曲分析默认值= MAX（MASS 或 MAX）

（1）在振动分析中，V1 和 V2 的单位是转/单位时间。在屈曲分析中，V1 和 V2 是特征值。屈曲分析的特征值是一个因子，和静态工况中的应力相乘后刚好可以使结构以对应的特征向量定义的振形发生屈曲。

（2）在振动分析中，特征向量默认根据质量矩阵进行归一化。在屈曲分析中，特征向量根据单位值进行归一化。NORM = MASS 选项在线性屈曲分析中不可用。

（3）根据根的大小顺序由小到大得到，即先计算接近 0 的根。计算的根的数目和种类根据表 6-4 决定。对于振动分析，V1 值为空时的默认值为−10。

表 6-4　EIGRL 根的确定方法

频率下限	频率上限	个　数	效　果
V1	V2	ND	根的数量和类型
V1	V2	ND	该范围内最低的 ND 个或者所有（如果没有 ND 个根）
V1	V2	空	该范围内所有
V1	空	ND	[V1，+∞]范围内最低的 ND 个
V1	空	空	大于 V1 的最低 1 个
空	空	ND	[−∞，+∞] 范围内最低的 ND 个
空	空	空	最低的一个
空	V2	ND	小于 V2 的最低 ND 个
空	V2	空	小于 V2 的所有

（4）Lanczos 特征值求解器提供两种不同的求解方法。如果定义的特征值范围没有上限（V2 空）而且要求的模态数少于 50（ND < 50），则求解器将自动选择求解速度较快的方法。

（5）特征值将根据大小顺序输出。每一个特征值对应一个特征向量。

（6）在振动分析中，很小的负根通常是由于计算机浮点运算的计算误差造成的，表示刚体模态。其他负根表明建模有问题。如果明确将 V1 设为 0，V1 将被忽略。需要计算刚体模态时不建议将 V1 设为 0。

（7）MSGLVL 控制特征值提取过程中的诊断输出。默认值 0 抑制所有诊断输出。值 1 表示在每一次转换（Shift）后输出得到的特征值。更高的值表示更高的诊断输出水平。

（8）MAXSET 用于限制 Lanczos 求解器的最大块尺寸。如果没有足够的可用内存时，则可以减小该值。推荐使用默认值。

（9）指定 SHFSCL 可以提高振动分析的性能。也可以用来提高屈曲分析的性能，尤其是施加的载荷与初始屈曲载荷大小不在同一数量级时。

（10）该卡片在 HyperMesh 中是 loadcollector。

2．EIGRA 卡片

使用自动多级子结构方法进行实特征值提取所需的输入数据。

EIGRA 卡片格式如表 6-5 所示。

表 6-5　EIGRA 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
EIGRA	SID	V1	V2	ND		AMPFACT		NORM	

EIGRA 卡片示例如表 6-6 所示。

表 6-6　EIGRA 卡片示例

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
EIGRA		0.1	3.2	10					

EIGRA 卡片格式各项参数说明如表 6-7 所示。

表 6-7　EIGRA 各项参数说明

项	内　　容
SID	ID 号，无默认值（整型> 0）
V1,V2	感兴趣的频率范围（转/时间） V2 必须定义 V1 默认值= 0.0（V1 < V2，实型或 V1 为空）
ND	希望计算的根的个数 无默认值（整型> 0 或空）
AMPFACT	放大因子。将求解频率在 AMPFACT×V2 以下的模态。增加该值可以提供计算精度，同时需要更多的计算时间 默认值=5.0（实型或空）
NORM	特征值归一化方法。如果是 MASS，则特征值将根据广义质量归一化（该选项对线性屈曲分析不可用）。如果是 MAX，则特征值将根据分析的最大位移进行归一化 模态分析默认值 = MASS

（1）V1 和 V2 的单位是转/单位时间。

（2）在振动分析中，特征向量默认根据质量矩阵进行归一化。

（3）所有根安装从小到大进行求解。最接近 0 的根最先被找到。

（4）求解的根可以由表 6-8 确定。

表 6-8　EIGRA 根的确定方法

频率下限	频率上限	个　　数	效　　果
V1	V2	ND	根的数量和类型
V1	V2	ND	[V1，V2] 范围内最低的 ND 个
V1	V2	空	[V1，V2] 范围内的所有
空	V2	ND	小于 V2 的最低 ND 个
空	V2	空	小于 V2 的所有

（5）特征值按照大小顺序进行输出。在振动分析中很小的负特征值通常是计算机零，表示有刚体模态。较大的负值表示有建模错误，如果在卡片中把 V1 明确写为 0，则

V1 将被忽略。

（6）AMPFACT 用于提高特征值和特征向量的计算精度，代价是会增加计算时间。推荐在发动机盖以及悬置零件等实体件上使用较大的值，如 10。

（7）该卡片在 HyperMesh 中是 loadcollector。

3．EIGC 卡片

定义复特征值提取需要的数据。

EIGC 卡片格式如表 6-9 所示。

表 6-9　EIGC 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
EIGC	SID		NORM	G	C		ND0		

EIGC 卡片的续行格式如表 6-10 所示。

表 6-10　EIGC 卡片的续行格式

	ALPHAAJ	OMEGAAJ					ND1		

EIGC 卡片示例如表 6-11～表 6-13 所示。

表 6-11　EIGC 卡片示例 1

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
EIGC	4		MAX				15		

表 6-12　EIGC 卡片示例 2

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
EIGC	4		MAX						
							15		

表 6-13　EIGC 卡片示例 3

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
EIGC	4		MAX						
	1000.0	1000.0					15		

EIGC 卡片格式中各项的解释如表 6-14 所示。

表 6-14　EIGC 卡片中各项的解释

项	内　　容
SID	ID 号，无默认值（整型> 0）
NORM	指定特征向量归一化方法 MAX：将实部的最大值变成单位 1，虚部变成 0 POINT：将第 5 项和第 6 项定义的实部分量归一化为单位值，将虚部归一化为 0。如果定义的分量值为 0，NORM 的默认值为 MAX

（续）

项	内　　容
G	Grid 或 scalar point ID 号，当且仅当 NORM = POINT 时需要，无默认值（整型> 0）
C	分量值，当且仅当 NORM = POINT 且 G 是一个几何点（geometric grid point）时需要，无默认值（0<整型< 6）
ND0	希望提取的根和特征向量，无默认值（整型> 0）
ND1	指定希望提取的根或特征值的个数，无默认值（整型> 0）
ALPHAAJ	shift point 的实部。默认值 = 0.0（实型）
OMEGAAJ	shift point 的虚部。默认值 = 0.0（实型）

（1）当没有续行时需要指定 ND0；如果有续行，则 ND0 必须为空。

（2）ALPHAAJ 和 OMEGAAJ 只在直接复特征值分析中有用。如果没有在 subcase 中指定 METHOD，则将使用直接法进行复特征值分析，其他情况下（subcase 中指定 METHOD）都使用模态法。

6.4　有限元分析中的单位制

RADIOSS Bulk Data 不规定所使用的物理量单位，用户可以根据不同领域和模型规模选择不同单位制，但是在一个问题中各物理量的单位必须统一，否则将导致计算结果错误。由于用户可能并不熟悉实际工程问题中遇到的某些不常用的物理量在特定单位制下的单位，特别是在动力学分析和热分析中尤其明显。这时就需要在确定基本物理量（质量、长度、时间和温度）的单位后根据物理量的量纲进行换算。表 6−15 所示是一些常用的单位的换算关系，表 6−16 所示是不同单位制下的单位，用户可以根据需要进行选用。

表 6−15　常用的单位的换算关系

物 理 量	量　纲	物 理 量	量　纲
速度 v	L/t	压力、应力、弹性模量等	M /（t^2•L）
加速度 a	L/t^2	热流量、功率	M •L^2/ t^3
密度 ρ	M / L^3	热导率 κ	M •L /（t^3•T）
力 F	M • L/t^2	比热容 c	L^2/（t^2•T）
力矩、能量等	M •L^2/t^2	热交换系数 α	M /（t^3• T）

表 6−16　不同单位制下的单位

参 数 名	单 位 量 纲	kg-m-s 单位制	kg-mm-s 单位制	t-mm-s 单位制	g-mm-s 单位制
长度 L	L	m	mm（10^{-3} m）	mm（10^{-3} m）	mm（10^{-3} m）
质量 m	M	kg	kg	t（10^3 kg）	g（10^{-3} kg）
时间 t	t	s	s	s	s
温度 T	T	K	K	K	K
力 F	M•L/t^2	N（牛）= kg•m/s^2	kg•mm/s^2（10^{-3} N）	t•mm/s^2（N）	g•mm/s^2（10^{-6} N）

（续）

参　数　名	单 位 量 纲	kg-m-s 单位制	kg-mm-s 单位制	t-mm-s 单位制	g-mm-s 单位制
密度 ρ	M/L^3	kg/m^3 （10^{-3} g/cm^3）	kg/mm^3 （10^6 g/cm^3）	t/mm^3 （10^9 g/cm^3）	g/mm^3 （10^3 g/cm^3）
能量、热量	$M\bullet L^2/t^2$	J（焦耳）=N•m $kg\bullet m^2/s^2$	$kg\bullet mm^2/s^2$ （10^{-6} J）	$t\bullet mm^2/s^2$ （10^{-3} J）	$g\bullet mm^2/s^2$ （10^{-9} J）
功率、热流量	$m\bullet L^2/t^3$	W（瓦）=J/s= $kg\bullet m^2/s^3$	$kg\bullet mm^2/s^3$ （10^{-6} W）	$t\bullet mm^2/s^3$ （10^{-3} W）	$g\bullet mm^2/s^3$ （10^{-9} W）
压力、应力、模量	M/（t^2 •L）	Pa=N/m^2 = kg/（s^2 •m）	kg/（s^2 •mm） （kPa）	t/（s^2 •mm） （MPa）	g/（s^2 •mm） （Pa）
热导率 κ	M•L/（t^3•T）	J/（m•s•K）= kg•m/（s^3·K）	kg•mm/（s^3•K） （10^{-3} kg•m/s^3•K））	t•mm/（s^3•K） （kg•m/（s^3•K））	g•mm/（s^3•K） （10^{-6} kg•m/ （s^3•K））
比热容 c	L^2 /（t^2 •T）	J/（kg•K）= （m^2/（s^2•K）	mm^2/（s^2•K） （10^{-6} m^2 /（s^2•K））	mm^2 /（s^2 •K） （10^{-6} m^2 /（s^2 •K））	mm^2 /（s^2 •K） （10^{-6} m^2 /（s^2•K））
热交换系数 α	M/（t^3•T）	J/（m^2•s•K）= kg/（s^3•K）	kg/（s^3 •K） （kg/（s^3•K））	t/（s^3•K） （10^3kg/（s^3•K））	g/（s^3•K） （10^{-3}kg/（s^3•K））

6.5　模态加速技术

这里的模态加速技术指自动多级子结构特征值求解方法（AMSES）。

在 AMSES 方法中每次只计算一个部分的特征向量。该方法对硬盘空间和 I/O 的需求都大幅度减小。因此，与 EIGRL 方法相比所需的计算时间要短得多。对于典型的 NVH 分析，关心的自由度一般只有 100 个左右。使用这种方法百万自由度的模型的求解只需要几个小时。AMSES 方法的不足之处在于，它的求解是不精确的，但是模态频率的精度依然可以达到小数点后几位。对于 NVH 分析来说，模态空间中的模态振型能够覆盖到尽可能多的变形模式比每一阶模态的值的精度更为重要，所以使用 AMSES 方法完全可以满足工程上对精度的要求。

对于本章 6.2.2 节中的白车身模型，如果使用 EIGRA（AMPFACT=5 默认值）时，与 EIGRL 相比，第 1 阶非刚体模态的频率误差为 0.2%，而且随着阶数的提高，误差不断积累，越来越大，第 9 阶非刚体模态的频率误差达到了 2%；使用 EIGRA（AMPFACT=15）时，与 EIGRL 相比计算时间有所增加，第 1 阶非刚体模态的频率误差不到 0.05%，同样随着阶数的提高，误差不断积累，越来越大，第 9 阶非刚体模态的频率误差为 0.23%。

总之，参考 EIGRL 的结果，使用 EIGRA 时，增大 AMPFACT 可以提高精度（计算时间有所增加），提高截断频率可以降低精度。

使用 EIGRA 和 EIGRL 计算得到的结果对比如表 6−17 所示。

表 6−17　EIGRA 和 EIGRL 计算结果对比

	EIGRL	EIGRA（AMPFACT=5）	ERROR%（与 EIGRL 相比）	EIGRA（AMPFACT=15）	ERROR%（与 EIGRL 相比）
第 1 阶	5.597619E-03	1.270579E-03	−77.30143834	1.270527E-03	−77.30236731
第 2 阶	4.415318E-03	1.383130E-03	−68.67428348	1.383202E-03	−68.6726528
第 3 阶	2.419712E-03	1.427140E-03	−41.02025365	1.427069E-03	−41.02318788
第 4 阶	1.602349E-04	1.441888E-03	799.8588947	1.441871E-03	799.8482852
第 5 阶	1.509518E-03	1.460132E-03	−3.271640351	1.460120E-03	−3.272435307
第 6 阶	9.821059E-03	1.546699E-03	−84.25119939	1.546687E-03	−84.25132157
第 7 阶	2.160789E+01	2.165147E+01	0.201685588	2.161780E+01	0.045862877

（续）

	EIGRL	EIGRA（AMPFACT=5）	ERROR%（与EIGRL 相比）	EIGRA（AMPFACT=15）	ERROR%（与EIGRL 相比）
第 8 阶	2.541949E+01	2.552858E+01	0.429158886	2.544255E+01	0.090717792
第 9 阶	3.040832E+01	3.058106E+01	0.568068213	3.044585E+01	0.123420169
第 10 阶	3.676249E+01	3.703347E+01	0.737110027	3.681878E+01	0.153118029
第 11 阶	3.946492E+01	3.995605E+01	1.244472306	3.953661E+01	0.181654999
第 12 阶	4.023174E+01	4.070955E+01	1.187644382	4.029084E+01	0.146898941
第 13 阶	4.153540E+01	4.229097E+01	1.819098889	4.164159E+01	0.255661436
第 14 阶	4.369212E+01	4.446875E+01	1.777505875	4.378784E+01	0.219078406
第 15 阶	4.876805E+01	4.974306E+01	1.999280266	4.887683E+01	0.223055874

6.6　本章小结

实特征值分析是很多动力响应分析的基础。因此，对于模态分析或者模态频率和振型的全面理解是理解所关心的特定结构的各种动力学分析的基础。通常进行动力学分析的第一步是做一个不考虑阻尼的模态分析，从而得到自然频率和模态振型。自然频率和模态振型决定了结构的基本动力学特性，是结构在动态激励作用下的响应的重要表征。

考虑阻尼的模态分析是复模态分析，所得到的分析结果为复数。复模态分析可以用于确定结构的不稳定模态。

第 7 章



频率响应分析

频率响应分析用于分析结构在简谐激励作用下的响应。典型的应用是车辆、旋转机械和传动系统 NVH（噪声、振动、舒适性）分析。频率响应分析和瞬态响应分析是同一个问题的两个方面。只不过一个是在频率域来考察问题，另一个是从时间域来考察问题。将瞬态响应分析的结果进行 FFT 变换即可得到对应的频率响应结果。

本章重点知识

7.1 频率响应分析基本理论
7.2 RADIOSS 频率响应分析流程
7.3 分析实例
7.4 相关卡片
7.4 本章小结

7.1 频率响应分析基本理论

频率响应分析的激励在频率域中定义。需要定义在给定频率下的激励（力或强制位移、速度、加速度）。频率响应分析的激励是一个复数，可以由幅值-相位或者实部-虚部表示。频率响应分析的载荷为正弦载荷。一个最简单的例子是具有固定频率和相同幅值的载荷，响应的频率和激励频率相同，阻尼使输出产生相位偏移（见图 7-1）。

频率响应分析的结果是力、位移、速度、加速度、应力和应变。响应通常也是复数，可以以幅值-相位或者实部-虚部的方式给出。

频率响应分析可以使用直接法和模态法进行计算。

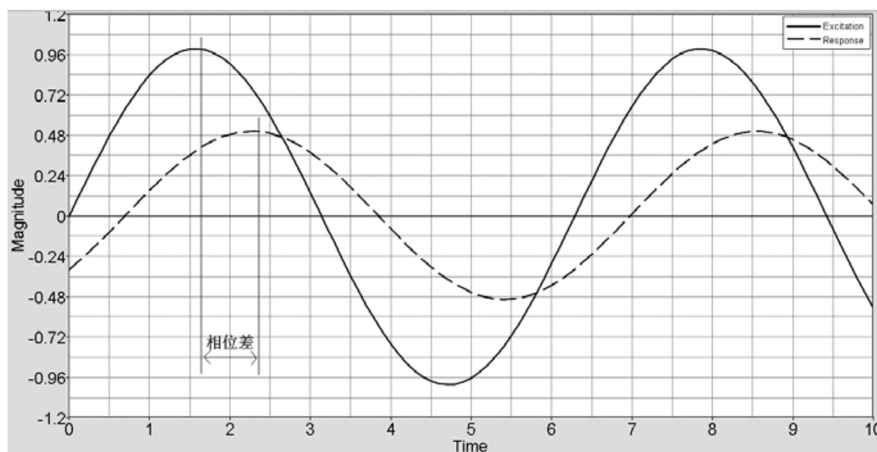


图 7-1　频率响应分析的激励和响应

1．直接频率响应分析

直接频率响应分析直接在离散的激励点通过求解下面的复矩阵方程（7-1）得到结构响应。

$$M\ddot{u} + B\dot{u} + Ku = Pe^{i\Omega t} \tag{7-1}$$

式中，Ω是载荷的角频率。假设在简谐激励下响应为式（7-2）的简谐函数：

$$u = de^{i\Omega t} \tag{7-2}$$

向量 $\boldsymbol{u}$ 是位移矢量，动力学分析可以根据实部和虚部导出式（7-3）所示的复矩阵方程：

$$\left(K - \Omega^2 M + iGK + iK_E - i\Omega B_1\right) de^{i\Omega t} = Pe^{i\Omega t} \tag{7-3}$$

式中，矩阵 $\boldsymbol{K}$ 是刚度矩阵，$\boldsymbol{M}$ 是质量矩阵。

系统中的阻尼可以通过以下 3 种不同的方法定义。

（1）使用均匀结构阻尼系数 G。

（2）通过材料以及 bushing 和 spring 单元属性中定义阻尼系数 GE 定义结构单元阻尼，这些组成矩阵 K_E

（3）通过粘性阻尼单元（CVISC）定义粘性阻尼，这些组成矩阵 $B1$。

运动方程直接使用复代数方法求解。

频率响应分析的载荷和边界条件在输入文件中的 Bulk Data 段定义。它们需要被 SUBCASE 段的 SPC 和 DLOAD 引用。直接频率响应分析不能使用惯性释放。如果试图使用惯性释放求解器会报错。要计算的频率必须使用 FREQUENCY（FREQ）申明。除了各种阻尼单元及材料阻尼外，还可以使用 PARAM 和 G 定义均匀全局结构阻尼。

2．模态频率响应分析

模态法首先进行模态分析得到系统的特征值 $\lambda_{\mathrm{i}} = \omega_{\mathrm{i}}^2$ 和响应的特征向量。

系统的响应可以表示为特征向量 $\boldsymbol{X}$ 和模态响应 $\boldsymbol{d}$ 的数量积，见式（7−4）：

$$u = Xd\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} \tag{7−4}$$

如果不考虑阻尼，运动方程可以使用特征向量变换到模态坐标系中，见式（7−5）：

$$\left(-\Omega^2 X^{\mathrm{T}} M X + X^{\mathrm{T}} K X\right) d\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} = X^{\mathrm{T}} P\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} \tag{7−5}$$

模态质量矩阵和模态刚度矩阵是对角矩阵。如果特征向量根据质量矩阵进行归一化处理，则模态质量矩阵将变成单位矩阵，模态刚度矩阵变成包含系统特征值的对角矩阵。这样系统方程就化简为一系列包含 $\boldsymbol{d}$ 的分量的解耦方程，可以容易地求解。

如直接法中讨论的一样，包含阻尼后可以得到式（7−6）：

$$\left(X^{\mathrm{T}} K X - \Omega^2 X^{\mathrm{T}} M X + \mathrm{i} G X^{\mathrm{T}} K X + \mathrm{i} X^{\mathrm{T}} K_E X - \mathrm{i}\Omega X^{\mathrm{T}} B_1 X\right) d\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} = X^{\mathrm{T}} P\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} \tag{7−6}$$

式（7−6）中，通常 $X^{\mathrm{T}}K_EX$ 和 $X^{\mathrm{T}}B_1X$ 是非对角矩阵。所以，和直接法类似该问题也变成了一个耦合问题，但是方程的自由度比直接法要少很多。该方程的求解也只能用直接法。

如果运动方程可以解耦，则方程的求解速度可以快很多。这可以通过对每一阶模态单独施加阻尼来实现。可以使用 TABDMP1 来定义每一阶模态 g_i 对应的阻尼 f_i，同时注意此时不能再定义结构单元的阻尼或粘性阻尼。

解耦后的方程见式（7−7）：

$$\left(-\Omega^2 m_i + \mathrm{i}\Omega b_i + k_i\right) d_i \mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} = p_i \mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} \tag{7−7}$$

其中，$b_i = 2m_i\omega_i\zeta_i$ 是模态阻尼比，ω_i^2 是模态特征值。

可以定义 3 类模态阻尼。

- G：结构阻尼。
- $CRIT$：临界阻尼。
- Q：损耗因子。

在共振时的相互换算关系见式（7−8）～式（7−10）：

$$G : \zeta_i = \frac{b_i}{b_{cr}} = \frac{g_i}{2} \tag{7−8}$$

$$CRIT : b_{cr} = 2m_i\omega_i \tag{7−9}$$

$$Q : Q = \frac{1}{2\zeta_i} = \frac{1}{g_i} \tag{7−10}$$

如果使用 PARAM, KDAMP, −1 选项，模态阻尼会进入复刚度矩阵（和结构阻尼一样）。解耦后的方程见式（7−11）：

$$\left[-\Omega^2 m_i + \left(1 + \mathrm{i}g\left(\Omega\right)\right)K_i\right] d\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} = p_i \mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t} \tag{7−11}$$

如果把基于动态载荷的静态分析位移矢量加入到特征值向量矩阵 $\boldsymbol{X}$，则模态法的求解精度可以大幅度提高。这些向量通常被称为残余矢量，这种方法称为模态加速。

该方法有以下两种实现方法。

（1）单位载荷法。通过在动载自由度上施加单位静载得到残余矢量。也就是说，生成残余矢量使用的静载荷是施加在动载激励施加自由度上的单位矢量。残余矢量的个数等于加载的自由度数。

（2）施加载荷法。最多生成两个残余矢量，它们是加载频率为 0 时的动载矢量。如果实部和虚部相同或者其中一个为 0，则只使用其中一个。该方法效率更高，是默认的方法。

在位移激励的情况下，残余矢量通过求解静态载荷工况得到，即在动态位移激励的自由度上施加单位位移。

图 7−2 展示了使用残余矢量方法的模态频率响应分析和精确的直接法的结果对比，从图中可以看到施加残余矢量后频率响应分析的结果精度得到了大幅度提高。

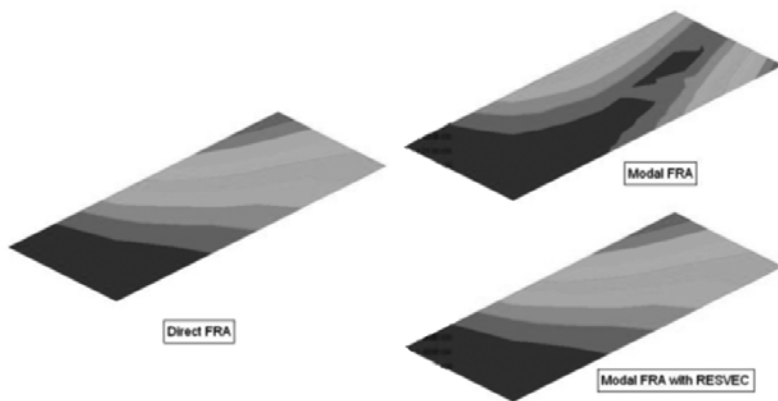


图 7−2　使用残余矢量方法的模态频率响应分析和直接法的结果对比

频率响应分析的载荷和边界条件在输入文件的 Bulk Data 段定义，并且需要被 SUBCASE 段的 SPC 和 DLOAD 引用。

残余矢量可以用于模态频率响应/声学/瞬态分析。使用残余矢量可以提高计算精度，是 RADIOSS 的默认设置。如果用户需要控制，可以使用工况控制段的 RESVEC 选项：

RESVEC（APPLOD/UNITLOD,DAMPLOD/NODAMP）=Value

Value 的取值可以是 Yes 或 No。如果 Value 值为 No，括号内的关键字将被忽略，这种情况下残余矢量计算被取消。

APPLOD 关键字根据模态频率响应/声学/瞬态分析的动载生成残余矢量。

UNITLOAD 关键字根据动载自由度上的单位载荷生成残余矢量。

DAMPLOD 关键字根据粘性阻尼自由度上的单位载荷生成粘性阻尼残余矢量 RESVEC。

关键字 NODAMP 关闭生成粘性阻尼残余矢量（默认情况下生成）。

虽然 DAMPLOD 和 NODAMP 是工况控制段的选项，它们仍然会作用于模型中所有模态 FRF/声场分析/瞬态响应分析。

当使用 Lanczos 法进行特征值分析时，默认情况下会生成基于应用载荷和粘性阻尼的残余矢量。如果是使用 AMLS 进行特征值分析，则默认情况下会基于自由度单位载荷法和粘性阻尼自由度法生成残余矢量。只要定义了强制位移、速度和加速度激励就会生成残余矢量。

如果包含了残余矢量，则对于无约束模型会自动启用惯性释放分析。用户可以通过 PARAM, INREL, −1 并在自由度上指定 SUPORT1 或 SUPORT 来约束刚体位移。使用 SUBCASE 段的 SUPORT1 引用用于约束刚体位移的边界条件。这些约束也可以无需通过 SUBCASE 段引用 SUPORT Bulk Data 项定义。可以使用自动的惯性释放功能 PARAM, INREL, −2（默认），自动生成需要的 SUPORT/SUPORT1。如果生成残余矢量 RESVEC 时不希望进行惯性释放，则需要设置 PARAM, INREL, 0 或 PARAM, AUTOSPRT, 0 将其关闭。

如果对残余矢量生成使用了自动惯性释放（使用默认值或用户指定 PARAM, INREL, −2），特征值分析得到的 FRF/瞬态响应特征模态将用于惯性释放分析。所有低于极限值（FZERO）的模态都将作为刚体模态在惯性释放分析中使用。如果没有低于 FZERO 的模态，系统将根据模型几何生成 6 个全局刚体模态并用于惯性释放分析。用户可以通过 PARAM、FZERO 和 Value 设置 FZERO 值。FZERO 的默认值为 0.1。

必须在 SUBCASE 段使用 FREQUENCY 定义一个频率集，使用 METHOD 定义模态提取方法。为了节约计算时间，之前保存的特征向量可以通过 SUBCASE 段的 EIGVRETRIEVE 提取。除了各种粘性阻尼单元和材料阻尼外，还可以通过 PARAM 和 G 定义全局的均匀结构阻尼。

模态阻尼通过 SDAMPING 应用阻尼表 TABDMP1 施加。PARAM 和 KDAMP 参数用于定义阻尼表的定义方法。

7.2 RADIOSS 频率响应分析流程

频率响应分析的相关卡片如图 7-3 所示。

SUBCASE 定义如下。

（1）SPC：指向包含边界条件的 loadcollector ID（no card image）。

（2）DLOAD：指向包含激励的 loadcollector ID（card image 为 RLOAD1 或 RLOAD2）。

（3）DAREA 或 SPCD：约束（在 constraints 面板定义，类型为 DAREA 或 SPCD）。力的激励使用 DAREA，位移、速度、加速度的激励使用 SPCD（需要在施加 SPCD 的同一自由度上施加 SPC，否则计算会报错）。这些约束必须被放在没有 card image 的 loadcollector 中，它们将被 RLOAD1 或 RLOAD2 引用。

（4）TABLED：card image 为 TABLED 的 loadcollector，用于定义激励大小随频率变化的曲线，它们将被 RLOAD1 或 RLOAD2 引用。

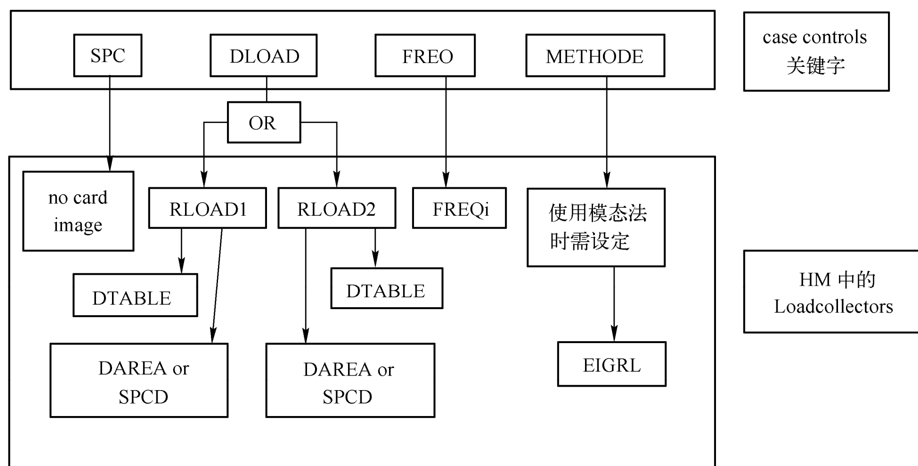


图 7-3 频率响应分析的相关卡片

（5）FREQ：card image 为 FREQi（其中 i 可以为 0～5）的 loadcollector，用于定义需要求解器计算的频率点。

（6）METHOD：card image 为 EIGRL 的 loadcollector，用于定义特征值提取的参数。

在 RADIOSS 中定义直接频率响应分析的步骤如下。

（1）定义 SPC load collector 并施加约束。

（2）定义单位载荷。

1）力的激励使用 DAREA。

2）位移、速度和加速度的激励使用 SPCD（需要在施加 SPCD 的同一自由度上施加 SPC，否则计算会报错）。

（3）定义动载与频率表格 F（f）：TABLED1、TABLED2、TABLED3 和 TABLED4。

（4）定义要在求解中使用的频率列表：FREQ、FREQ1 和 FREQ2 等。

（5）定义简谐动载荷：RLOAD1 和 RLOAD2。

（6）定义频率响应工况。

（7）定义频率响应输出：DISPLACEMENT、VELOCITY、ACCELERATION 和 STRESS。

在 RADIOSS 中定义模态频率响应分析步骤如下。

（1）定义 SPC load collector 并施加约束。

（2）定义单位载荷。

1）力的激励使用 DAREA。

2）位移、速度和加速度的激励使用 SPCD（需要在施加 SPCD 的同一自由度上施加 SPC，否则计算会报错）。

（3）定义求解模态的 EIGRL load collector。

（4）定义动载与频率表格 F（f）：TABLED1、TABLED2、TABLED3 和 TABLED4。

（5）定义要在求解中使用的频率列表：FREQ、FREQ1、FREQ2、FREQ3、FREQ4 和 FREQ5。

（6）定义简谐动载荷：RLOAD1 和 RLOAD2。

（7）定义频率响应工况。

（8）定义频率响应输出：DISPLACEMENT、VELOCITY、ACCELERATION 和 STRESS。

7.3 分析实例

7.3.1 平板的直接频率响应分析

本例演示如何导入一个有限元模型、施加边界条件，对平板进行有限元分析，使用直接法对平板施加随频率变化的单位载荷激励（本例中激励的幅值大小没有变化，实际应用时可以是变化的）。在 HyperView 和 HyperGraph 中进行后处理观察其变形，在 HyperGraph 中查看模态响应和频率-相位输出曲线。

STEP 01 启动 HyperMesh 并且选择 RADIOSS（Bulk Data）用户模板

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 UserProfiles 对话框。如果没有弹出，可以从工具栏中的 Preference 下拉菜单进入。

（2）在 UserProfiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

STEP 02 导入有限元模型文件

（1）选择 File→Import→Solver Deck 命令。

（2）在 File type 中选择 RADIOSS（BulkData）。

（3）选择文件 direct_response_flat_plate_input.fem，单击 Open，然后单击 Import 导入模型。

（4）在 HyperMesh 中进行工况设置。

STEP 03 对模型施加载荷和边界条件

在接下来的步骤中，会约束模型的一条边，并在平板的另一条自由边上的节点施加一个沿着 *Z* 轴正向的单位载荷。

（1）单击 Model 标签。

（2）在 Model Browser 窗口的空白区域单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create →LoadCollector。

（3）在 Name 中输入 spcs，单击 color 并从调色板中选择一种颜色。

（4）Card image 选项选择 None，单击 Create 创建载荷集 spcs。

（5）在 Model Browser 窗口内部单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create→LoadCollector。

（6）在 Name 文本框中输入 unit-load，单击 color 并从调色板中选择一种颜色。

（7）Card image 选项选择 None，单击 Create 创建载荷集 unit-load。

STEP 04 创建约束

（1）在 Model Browser 中展开 LoadCollector，用鼠标右键单击 spcs，选择 Make Current，如图 7-4 所示。

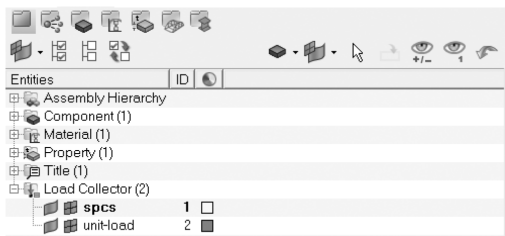


图 7-4　设定当前载荷集

（2）选择面板区的 Tool→numbers。

（3）单击 nodes 并且在扩展选项菜单中选择 displayed。

（4）单击 on（绿色按钮），单击 return 回到主菜单。现在平板上的所有节点的编号都显示出来了。

（5）单击 BCs→Create→Constraints，打开 Constraints 面板。

（6）单击 entity selection，选择 nodes。

（7）单击 nodes，选择节点 5、29、30、31 和 32，如图 7-5 所示。

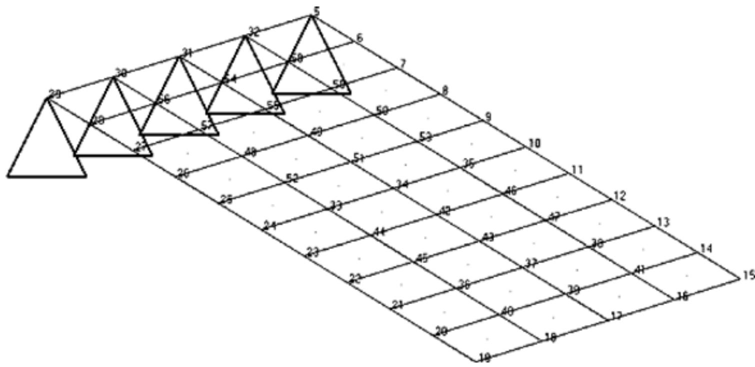


图 7-5　施加点约束的节点

（8）约束 dof1～dof5 自由度，单击 create，单击 return 返回主菜单。

因为 dof6 没有被标记，所以被选择的节点绕 *Z* 轴转动的自由度是自由的。由于本例所受载荷仅使结构产生弯曲效应，不会有面内剪切，所以 dof6 是否约束影响不大。

STEP 05 在平板的一个点上创建单位载荷

（1）展开 Model Browser 中的 LoadCollector，在 unit-load 上右键单击并选择 Make

Current。

（2）单击 Analysis→constraints 面板。

（3）在面板上单击选择 19 号节点，如图 7-6 所示。

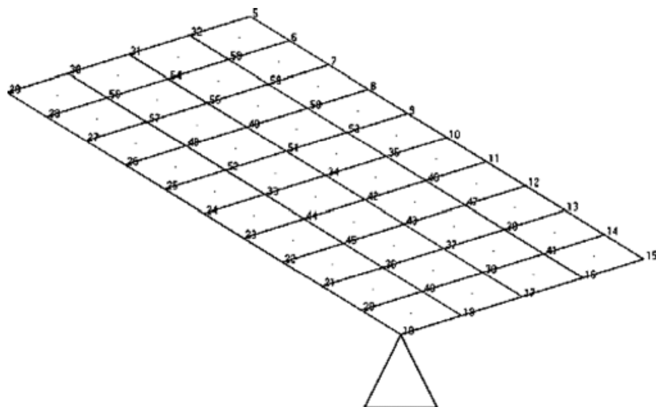


图 7-6　创建单元垂直载荷所选的节点

（4）去掉除了 dof3 以外的所有标记，单击 dof3 右边的 =，输入 20。

（5）单击 load types=并从扩展菜单中选择 DAREA，单击 create，然后单击 return 返回。

STEP 06 创建频率范围表

（1）在 Model Browser 窗口内单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create，然后单击 LoadCollector。

（2）在 Name 文本框中输入 tabled1，单击 color 并从调色板中选择一种颜色。

（3）在 Card image 下拉列表中选择 TABLED1。

（4）单击 create/edit，在工作区域屏幕中出现一个新的窗口。

（5）单击 TABLED1_NUM = 输入 2。

（6）单击 x（1）下面的文本框输入 0.0，单击 y（1）下面的文本框输入 1.0。

（7）单击 x（2）下面的文本框输入 1000.0，单击 y（2）下面的文本框输入 1.0。

（8）单击 return。这就创建了幅值为 1.0，范围为 0～1000Hz 的频率-幅值表。

STEP 07 创建频率相关的动载荷

（1）在 Model Browser 窗口内单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create，然后单击 LoadCollector。

（2）在 Name 文本框中输入 rload2，单击 color 并从调色板中选择一种颜色。

（3）在 Card image 下拉列表中选择 RLOAD2，单击 create/edit，在工作区域中出现一个新的窗口。

（4）单击两次 EXCITEID，在左下角出现载荷集列表。

（5）从载荷集列表中选择 unit-load，单击 return， EXCITEID 下显示为 2。

（6）单击两次 TB，在左下角出现载荷集列表。

（7）选择 tabled1，单击 return。

这种激励可以是外部载荷（力或者力矩）、强迫位移、速度或者加速度。在 RLOAD2 卡片信息中的 [type] 定义了载荷的类型。默认的载荷设定为外部载荷。

STEP 08 创建响应求解的频率列表

（1）在 Model Browser 窗口内单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create，然后单击 LoadCollector。

（2）在 Name 文本框中输入 freq1，单击 color 并从调色板中选择一种颜色。

（3）在 Card image 下拉列表中选择 FREQi，单击 Create。在工作区域中出现一个新的窗口。在最下方选择 FREQ1，保持 NUMBER_OF_FREQ1=1 不变，上方出现新的界面。

（4）单击 F1，然后单击其下方的文本框并输入 20.0。

（5）单击 DF，然后单击其下方的文本框并输入 20.0。

（6）单击 NDF，然后单击其下方的文本框并输入值 49，单击 return。这样就建立了频率列表，初始值为 20.0，步长是 20.0，频率递增 49 次。

STEP 09 创建 RADIOSS 的载荷工况

（1）单击 Setup→Create→LoadSteps，打开 LoadSteps 面板。

（2）单击 name =，输入 SUBCASE1。

（3）单击 type，选择 freq.resp（direct）。

（4）选中 SPC 复选框，在 SPC 右边出现一个文本框。

（5）单击该文本框并从载荷集中选择 spcs。

（6）选中 DLOAD 复选框，在 DLOAD 右边出现一个文本框。

（7）单击该文本框并从载荷集中选择 rload2。

（8）选中 FREQ 复选框，在 FREQ 右边出现一个文本框。

（9）单击该文本框并从载荷集中选择 freq1，单击 create，然后单击 return 回到主面板。

这就创建了一个 RADIOSS 的 loadstep。它包括载荷集 spc 的约束、载荷集 rload2 的单位动态载荷和由载荷集 freq1 定义的一组频率。

STEP 10 创建节点集合用于输出结果

（1）进入 Analysis 中的 entity sets 面板。

（2）单击 name =输入 SETA，在 card image 选项中选择 no card image。

（3）Set type 设置成 non-ordered。

（4）将黄色的 entity 选择框设置为 nodes。

（5）选择 ID 号为 15、17 和 19 的节点，单击 create，然后单击 return 退出面板。在信息栏会出现 The entity set has been created。

STEP 11 创建频率响应分析的一组输出和质量单位转换比例系数

（1）单击 Setup→Create→Control Cards，进入 Control Cards 面板。

（2）选择 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST，并选中 DISPLACEMENT 复选框。

（3）在 FORM（1）下，从弹出的菜单中选择 PHASE；在 OPTION（1）下，从弹出的菜单中选择 SID。

（4）单击两次 SID 并选择 SETA。

（5）在 SID 文本框的下方出现值 1，表示只输出 set ID=1 中的节点结果。

（6）单击 return 退出 GLOBAL_OUTPUT_REQUESTS 面板。

（7）在 Control Cards 面板中选择 FORMAT。

（8）在工作区域中出现了新的窗口，单击下方的 number_of_formats =并输入 2。

（9）在工作区域扩展菜单中，单击第一个文本框 FORMAT_V1 并在弹出的菜单中选择 OPTI。使用 OPTI 会生成 RADIOSS ASCII 类型的.disp 和.strs 等结果文件。运行一旦完成，这些文件将被用于后处理中。

（10）确保第二个文本框中是 H3D。

（11）单击 return 退出 Format 菜单并返回 Control Cards 菜单。

（12）单击 next 并选择 PARAM 子面板，在左下角选中 COUPMASS，在工作区域中出现一张新的 PARAM 卡片。

（13）在 COUPM_V1 下单击 NO 并且在弹出的菜单中选择 YES。选择 YES 是使用耦合质量矩阵法进行特征值分析。

（14）选中 G 复选框，在工作区域中出现一张新的 PARAM 卡片。

（15）单击 G_V1 下方，在文本框中输入 0.06。

提示：这个值指定了统一的结构阻尼系数，数值通过临界阻尼乘以 2.0 得到（也就是说结构的阻尼 3%，具体计算见本章开头理论部分）。用户也可以通过模态阻尼指定阻尼。

（16）选中 WTMASS 复选框，工作区域中出现一个新的窗口。

（17）单击 WTM_V1 下方，在文本框中输入 0.00259，工作区域中弹出的菜单中出现 3 个 PARAM 申明。

提示：WTMASS 是将质量密度、重量密度转换的一个系数，比如用户将密度设置的是重量密度（如 N/m^3，有的国家的人习惯这么用），WTMASS 就要设成 1/g，将重量密度转化为正常的质量密度。例子中使用的是英制单位。1g=386.1 in/sec2 所以我们需要一个转换系数 1/386.1=0.00259 将重量密度转换成质量密度。如果用户的密度设置是使用的一致单位制这里就不需要设置这个系数了。

（18）单击 return 退出 PARAM 菜单。

（19）选择 OUTPUT 子面板，确认 KEYWORD 设置为 HGFREQ。使用 HGFREQ 将为

HyperGraph 生成一个结果报告。

（20）单击 FREQ 下方复选框并在弹出的选项中选择 ALL。选择 ALL 将为所有的频率输出结果文件。

（21）将 number_of_outputs 设置成等于 1。

（22）单击 return 退出 OUTPUT。

（23）单击 return 退出 Control Cards 面板。

STEP 12 提交计算，运行 RADIOSS

（1）从 Analysis 页面进入到 RADIOSS 面板。

（2）在 input file 中单击 save as。

（3）选择 RADIOSS 模型保存目录，在 File name 中输入模型名字 flat_plate_direct_response.fem，单击 Save。

（4）选择 run options，设置为 analysis。单击 RADIOSS 提交任务。

STEP 13 查看结果

该步骤介绍在 HyperGraph 中如何去观察位移结果（.mvw 文件），同时解释结果输出（.disp 文件）。HyperView 结果（.h3d 文件）只包含在 set 中指定的 3 个节点的位移。

（1）单击 HyperView 按钮，启动 HyperView。单击 Close 关闭 Message Log 窗口。

（2）在 HyperView 窗口中，单击 File→Open→Sessions。

（3）选择文件 flat_plate_direct_response_freq.mvw 并单击 Open。

（4）在出现 whether to discard the existing contents 提示的时候，单击 Yes。总共 3 页，每页显示两个图。

在第一页，显示 Subcase 1（subcase1）-Displacement of grid 15。该页有两个结果：顶部曲线显示与频率对应的相位角，底部曲线显示与频率对应的位移幅值响应，如图 7-7 所示。

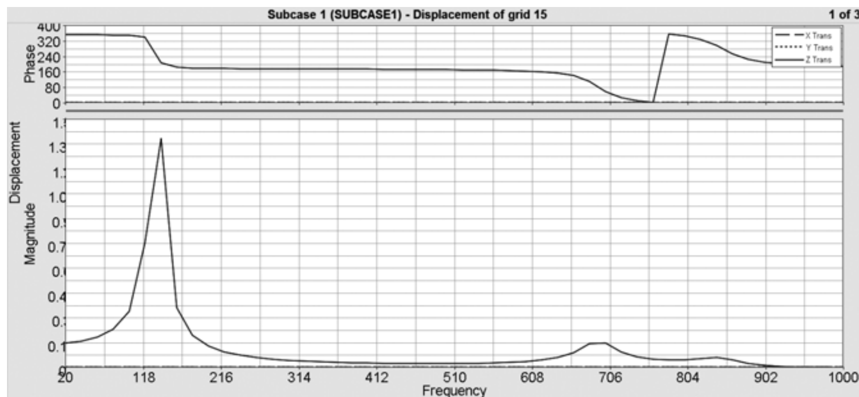


图 7-7　节点 15 的频率响应

单击 Next Page 按钮。显示的第二页内容为 Subcase 1（subcase1）- Displacement of grid 17，如图 7-8 所示。

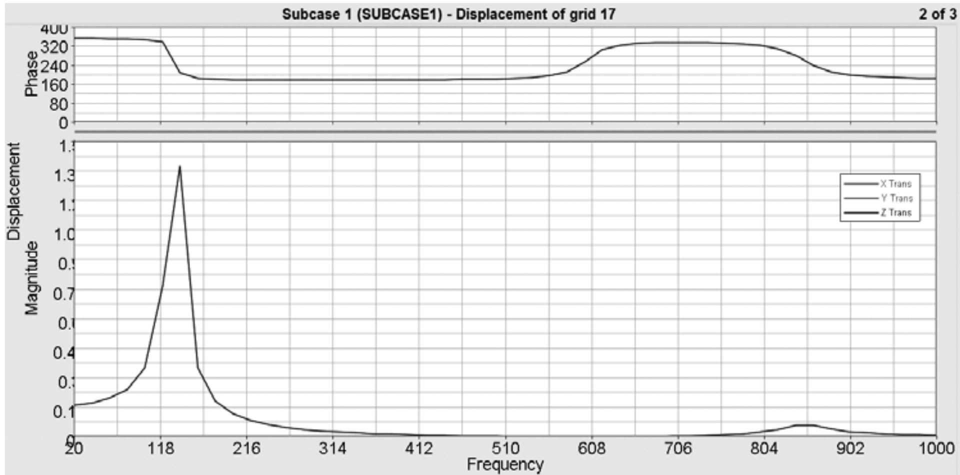


图 7-8　节点 17 的频率响应

（5）再次单击 Next Page 按钮，显示的第三页内容 Subcase 1（subcase1）- Displacement of grid 17，如图 7-9 所示。

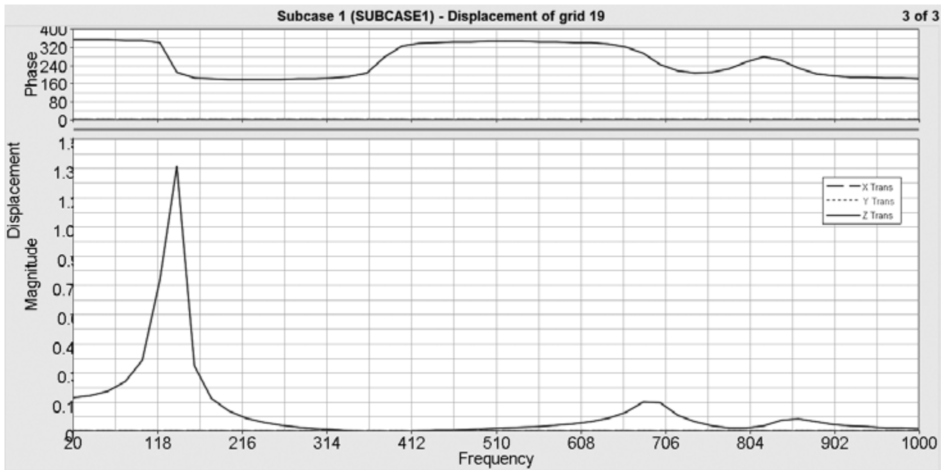


图 7-9　节点 19 的频率响应

这样就完成了 HyperGraph 的结果处理。

（6）使用文本编辑器打开位移文件（.disp）。

第二行第一块区域显示了迭代步数，第二块区域显示了数据点数，第三块区域显示了迭代频率。

第三行第一块区域显示了节点编号，接着是 *x*、*y* 和 *z* 向的位移大小，然后是 *x*、*y* 和 *z* 向的转动量大小。

第四行第一块区域显示了节点编号，接着是 *x*、*y* 和 *z* 向的位移相位角，最后是 *X*、*Y* 和 *Z* 轴的转动量。

7.3.2 平板的模态频率响应分析

STEP 01 启动 HyperMesh 并且将用户模板设置为 RADIOSS（Bulk Data）

STEP 02 导入有限元模型文件（参照 7.3.1 节）

STEP 03 ～ STEP 11 为在 HyperMesh 中进行工况设置。

STEP 03 对模型施加载荷和边界条件（参照 7.3.1 节）

STEP 04 创建约束（参照 7.3.1 节）

STEP 05 在平板的一个点上创建单位载荷（参照 7.3.1 节）

STEP 06 创建频率范围表

（1）单击 LoadCollector 按钮。
（2）选择 create 子面板。
（3）单击 loadcol name = 输入 tabled1，单击 color 选择一种颜色。
（4）单击 loadcol name = 下面的选项，切换成 card image。
（5）单击 card image=并从下拉菜单中选择 TABLED1。
（6）单击 create/edit，在工作区域中弹出一个新的窗口。
（7）单击 TABLED1_NUM = 输入 2。
（8）保持 x（1）下面的文本框设置为 0.0，单击 y（1）下面的文本框输入 1.0。
（9）单击 x（2）下面的文本框输入 1000.0，单击 y（2）下面的文本框输入 1.0。单击 return 返回。

自此创建了频率范围在 0～1000Hz、幅值为定值 1.0 的激励曲线。

STEP 07 创建频率相关的动载荷

（1）单击 loadcol name =输入 rload2，单击 color 选择一种颜色。
（2）单击 loadcol name =下面的选项，切换成 card image。

（3）单击 card image=并从下拉菜单中选择 RLOAD2。
（4）单击 create/edit，在工作区域中弹出一个新的窗口。
（5）单击两次 EXCITEID，在左下角出现载荷集列表。
（6）从载荷集列表中选择 unit-load，EXCITEID 下边显示为 2。
（7）单击两次 TB，在左下角出现载荷集列表。
（8）选择集列表中的 tabled1，单击 return 返回 Load Collectors 面板。

这种激励可以是外部载荷（力或者力矩）、强迫位移、速度或者加速度。在 RLOAD2 卡片信息中 [type] 定义了载荷的类型。默认的载荷设定为外部载荷。

STEP 08 创建响应求解的频率列表

（1）单击 loadcol name =输入 freq1，单击 color 并选择一种颜色。
（2）单击 card image=并从下拉菜单中选择 FREQi。
（3）单击 create/edit。
（4）在下方选择 FREQ1，保持 NUMBER_OF_FREQ1=1 不变，上方出现新的输入项。
（5）单击 F1，然后单击其下方的文本框并输入 20.0。
（6）单击 DF，然后单击其下方的文本框并输入 20.0。
（7）单击 NDF，然后单击其下方的文本框并输入 49。
（8）单击 return 返回到 Load Collectors 面板。

这样就建立了频率列表。初始值为 20.0，步长是 20.0，频率增加 49 次。

STEP 09 使用 Lanczos 方法创建模态法特征值分析，并指定特征值提取的频率范围

（1）单击 loadcol name =输入 eigrl。
（2）单击 color 并从调色板中选择一种颜色。
（3）单击 loadcol name = 下面的选项，切换成 card image。
（4）单击 card image=并从下拉菜单中选择 EIGRL。
（5）单击 create/edit。
（6）单击 [V1] 并在下方输入 0.0，然后单击 [V2] 并输入 1000.0。
（7）单击 3 次 return 返回到主面板。

这里指定了使用 Lanczos 方法进行特征值提取的频率范围是从 0～1000Hz。

STEP 10 创建 RADIOSS 的载荷工况

（1）单击 Setup→Create→LoadSteps，打开 LoadSteps 面板。
（2）单击 name =输入 SUBCASE1。
（3）单击 type，选择 freq.resp（modal）。选中 SPC 复选框，在 SPC 右边出现文本框。
（4）单击该文本框并从载荷集中选择 spcs。

（5）选中 METHOD（STRUCT）复选框，在 METHOD（STRUCT）右边出现文本框。

（6）单击该文本框并从载荷集中选择 eigrl。

（7）选中 DLOAD 复选框，在 DLOAD 右边出现文本框。

（8）单击该文本框并从载荷集中选择 rload2。

（9）选中 FREQ 复选框，在 FREQ 右边出现文本框。

（10）单击该文本框并从载荷集中选择 freq1，单击 create，然后单击 return 回到主面板。

这就创建了一个 RADIOSS 的工况。它包括载荷集 spc 的约束、载荷集 rload2 的单位载荷、载荷集 freq1 定义的一组频率和载荷集 eigrl 定义的模态方法。

STEP 11 创建输出结果的节点集 node set（参考 7.3.1 节）

STEP 12 创建频率响应分析的一组输出（参考 7.3.1 节）

STEP 13 提交作业

（1）从 Analysis 页面进入到 RADIOSS 面板。

（2）在 input file 中单击 save as。

（3）选择 RADIOSS 模型的保存目录，在 File name 中输入模型名字 flat_ plate_modal_response.fem，单击 Save。

（4）单击 run options，设置为 analysis。

（5）单击 RADIOSS 提交任务。

STEP 14 检查结果（参照 7.3.1 节）

7.3.3 轮毂的频率响应分析

本例使用模态法频率响应分析对轮毂施加频率变化的单位载荷激励，并在 HyperGraph 中观察响应输出曲线。

STEP 01 启动 HyperMesh 并且设置 RADIOSS（Bulk Data）用户配置文件

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 UserProfiles 对话框。如果没有弹出，可以从工具栏中的 Preferences 下拉菜单进入。

（2）在 UserProfiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

STEP 02 导入有限元模型文件 dynamic_stiffness.hm

（1）在 File 下拉菜单中单击 Open，弹出 Open model 窗口。

（2）在光盘中找到 dynamic_stiffness.hm 文件并打开。

STEP 03 创建输出结果的一组节点

（1）从 Analysis 页面进入 entity sets 面板。

（2）单击 name =输入 SET1。

（3）单击 name 下的转换按钮并选择 no card image。

（4）将 Set type 设置成 non-ordered。

（5）确认 entity 设置成 nodes。

（6）缩放模型，选择如图 7-10 所示的两个节点。

（7）单击 create，在信息栏会出现：The entity set has been created。

（8）单击 return 退出 Entity Sets 面板。

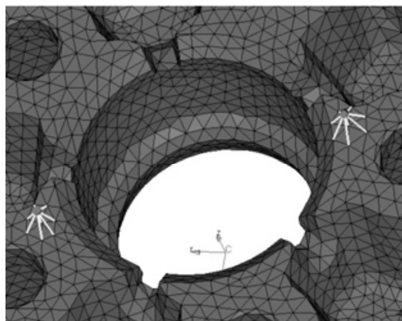


图 7-10　创建输出结果的一组节点集

STEP 04 ～ STEP 12 为在 HyperMesh 中进行工况设置。

STEP 04 对模型施加载荷约束

（1）单击 Load Collectors 按钮 。

（2）选择 create 子面板。

（3）单击 loadcol name =，输入 M1。

（4）单击 color 在调色板中设置一种颜色。

（5）选择 no card image，单击 create，这样就新建了一个载荷集 M1。

（6）进入 Analysis 中的 constraints 面板。

（7）在 nodes 中选择节点，如图 7-11 所示。

（8）选中自由度 dof3，修改复选框内值为 1.0。load types 选择为 DAREA。

（9）单击 create，然后单击 return 返回主菜单。

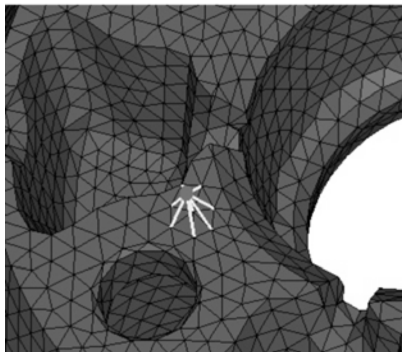


图 7-11　施加点约束的节点

STEP 05 创建频率范围表

（1）单击 LoadCollector 按钮，选择 create 子菜单。

（2）单击 loadcol name =，输入 tabled1。单击 color 在调色板中设置一种颜色。

（3）单击 card image= 并从下拉菜单中选择 TABLED1。

（4）单击 create/edit，在工作区域中弹出一个新的窗口。

（5）单击 TABLED1_NUM = 输入值 2。

（6）保持 x（1）下面的文本框设置为 0.0，单击 y（1）下面的文本框输入 1.0。

（7）单击 x（2）下面的文本框输入 2000.0，单击 y（2）下面的文本框文本 1.0，如图 7-12 所示。

图 7-12　创建 TABLED1 卡片

（8）单击 return。

自此创建了定值为 1.0、在 0～2000Hz 频率范围内的激励曲线。

STEP 06 创建频率相关的动载荷

（1）单击 loadcol name =，输入 rload2_1。单击 color 并从调色板中选择一种颜色。

（2）单击 card image= 并从下拉菜单中选择 RLOAD2。

（3）单击 create/edit，在工作区域中弹出一个新的窗口。

（4）单击两次 EXCITEID，在左下角出现载荷集列表。

（5）从载荷集列表中选择 M1，在 EXCITEID 的下边出现 1。

（6）单击两次 TB，在左下角出现载荷集列表，选择集列表中的最后一个 tabled1，如图 7-13 所示。

图 7-13　创建动载激励 RLOAD2

（7）单击 return 返回到 Load Collectors 面板。

STEP 07 创建 eigrl 卡片

（1）单击 loadcol name =，输入 eigrl。单击 color 并从调色板中选择一种颜色。

（2）单击 card image= 并从下拉菜单中选择 EIGRL。

（3）单击 create/edit。

（4）单击[V1]并在文本框下方输入 0.0，然后单击 [V2] 并输入 3000.0。

（5）单击 3 次 return 返回到主面板。

这里指定了使用 Lanczos 方法进行特征值提取的频率范围是 0～3000Hz。

STEP 08 创建响应求解的频率列表

（1）单击 loadcol name =，输入 freq1。单击 color，从调色板中选择一种颜色。
（2）单击 card image= 并从下拉菜单中选择 FREQi。
（3）单击 create/edit。
（4）在下方选择 FREQ1，保持 NUMBER_OF_FREQ1=1 不变，上方出现新的界面。
（5）单击 F1，然后单击其下方的文本框并输入 0。
（6）单击 DF，然后单击其下方的文本框并输入 1。
（7）单击 NDF，然后单击其下方的文本框并输入 1500。
（8）单击 return 返回到 Load Collectors 面板。

这样就建立了频率列表，初始值为 0，步长是 1，频率增加 1500 次。

STEP 09 创建 RADIOSS 的载荷工况

（1）从 Analysis 页面打开 load Steps 面板。
（2）单击 name =，输入 step1。
（3）单击 type，选择 freq.resp（modal）。
（4）选中 METHOD（STRUCT）复选框，在 METHOD（STRUCT）右边出现文本框。
（5）单击该文本框并从载荷集中选择 eigrl。
（6）选中 DLOAD 复选框，在 DLOAD 右边出现文本框。
（7）单击该文本框并从载荷集中选择 rload2_1。
（8）选中 FREQ 复选框，在 FREQ 右边出现文本框。
（9）单击该文本框并从载荷集中选择 freq1。
（10）单击 create，即创建了一个 RADIOSS 的载荷工况，如图 7-14 所示。



图 7-14　创建模态频率响应分析载荷步

（11）单击 return 返回到主面板。

STEP 10 建立另一个载荷约束

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子菜单。

（2）单击 loadcol name =，输入 M2。单击 color 在调色板中设置一种颜色。

（3）选择 no card image，单击 create。

（4）这样一个新的载荷集 M2 就被创建了。

（5）进入 Analysis 中的 constraints 面板。

（6）在 nodes 中选择节点，如图 7-15 所示。

（7）选中自由度 dof3，修改复选框内的值为 1.0。

（8）将 load types 选择为 DAREA。

（9）单击 create，单击 return 返回主菜单。

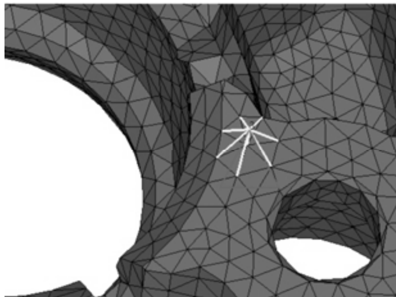


图 7-15　施加点约束的节点

STEP 11　创建另一个频率相关的动载荷

（1）单击 loadcol name =，输入 rload2_2。单击 color 并从调色板中选择一种颜色。

（2）单击 card image= 并从下拉菜单中选择 RLOAD2。

（3）单击 create/edit，在工作区域中弹出一个新的窗口。

（4）单击两次 EXCITEID，在左下角出现载荷集列表。

（5）从载荷集列表中选择 M2。

（6）单击两次 TB，在左下角出现载荷集列表。

（7）选择集列表中的 tabled1。

（8）单击 return 返回到 Load Collectors 面板。

STEP 12　创建第二个 RADIOSS 的载荷工况

（1）从 Analysis 页面，打开 loadSteps 面板。

（2）单击 name =，输入 step2。

（3）单击 type，选择 freq.resp（modal）。

（4）选中 METHOD（STRUCT）复选框，在 METHOD（STRUCT）右边出现文本框。

（5）单击该文本框并从载荷集中选择 eigrl。

（6）选中 DLOAD 复选框，在 DLOAD 右边出现文本框。

（7）单击该文本框并从载荷集中选择 rload2_2。

（8）选中 FREQ 复选框，在 FREQ 右边出现文本框。

（9）单击该文本框并从载荷集中选择 freq1。

（10）单击 create，这样就创建了另一个 RADIOSS 的载荷工况，如图 7-16 所示。



图 7-16　创建第二个模态频率响应分析载荷步

（11）单击 return 返回到主面板。

STEP 13 创建输出要求卡片

（1）进入 Analysis 中的 Control Cards 面板。
（2）选择 OUTPUT 子面板。
（3）确认 KEYWORD 设置为 HGFREQ。
（4）单击 FREQ 下方的选择框并在弹出的选项中选择 ALL。
（5）将 number_of_outputs 设置成等于 1，单击 return 退出 OUTPUT。
（6）单击 prev，在 Control Cards 面板中选择 FORMAT，在工作区域中弹出了新的窗口。
（7）单击 number_of_formats =，并输入 1。
（8）在工作区域下拉菜单中，单击第一个文本框 FORMAT_V1 并在弹出菜单中选择 OPTI。使用 OPTI 会生成.disp 和.strs 等 ASCII 结果文件。运行一旦完成，这些文件将被用于后处理中。
（9）单击 return 退出 Format 菜单并返回 Control Cards 菜单。
（10）选择 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST 并单击 ACCELERATION。
（11）单击 FORM（1），从弹出的菜单中选择 PHASE。
（12）单击 OPTION（1）下方，从弹出的菜单中选择 SID。
（13）出现一片黄色的区域。
（14）单击两次 SID 并选择 SET1。
（15）在 SID 文本框的下方出现值 1。这设置了输出时只输出集合 1 中的节点结果。

STEP 14 运行 RADIOSS

（1）从 Analysis 页面进入到 RADIOSS 面板。
（2）在 input file 中单击 save as。
（3）选择 RADIOSS 模型的目录，在 File name 中输入模型名字 dynamic_ stiffness_edit_ book2.fem，单击 Save。
（4）单击 run options，设置选择为 analysis。求解设置如图 7-17 所示。



图 7-17　求解设置

（5）单击 RADIOSS，这样就提交了 RADIOSS 任务。

STEP 15 检查结果

该步骤介绍在 HyperGraph 中观察位移结果（.mvw 文件），并解释这次运行的结果输出

（.disp file）。HyperView 结果（.h3d file）只包括指定的节点的位移。

（1）单击 HyperView 按钮，打开 HyperView。

（2）单击 Close 关闭 Message Log 窗口。

（3）在 HyperView 窗口中，单击 File→Open→Sessions。

（4）选择任务运行的目录并选择文件 dynamic_stiffness_edit_book2_freq.mvw。

（5）单击 Open，出现一个警告界面，单击 Yes。这样就可以看到总共 4 页，每页有两个图显示在页面上。在第一页显示 Subcase 1（step1）-Acceleration of grid 89489。

（6）单击 Axis 工具栏上的按钮，选择 Logarithmic 选项并设置为用对数坐标参数显示结果，单击 apply，（如图 7-18 所示）。

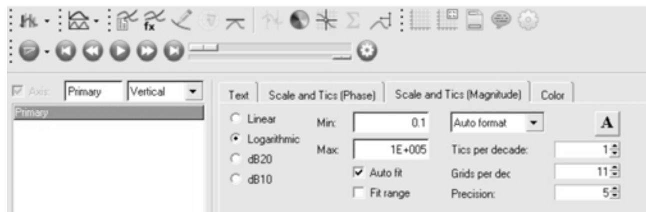


图 7-18　结果坐标参数设置

在这一页有两个结果：顶部显示与频率对应的相位角，底部显示与频率对应的幅值响应，如图 7-19 所示。

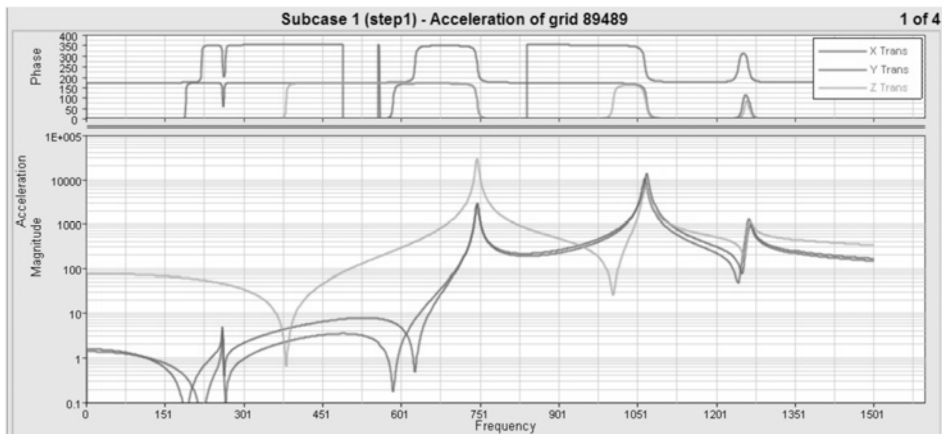


图 7-19　节点 89489 的频率响应

单击 Axis 工具栏上的 coordinate info 按钮，可以显示图中具体每个频率点的详细信息，如图 7-20 和图 7-21 所示。

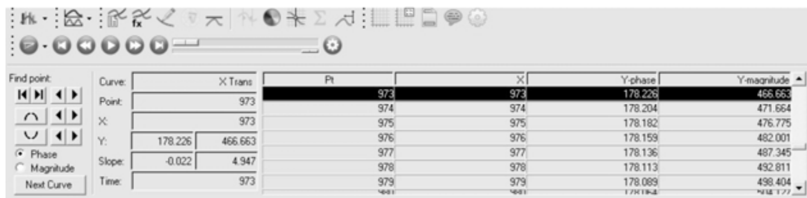


图 7-20　查看频率点的详细信息（一）

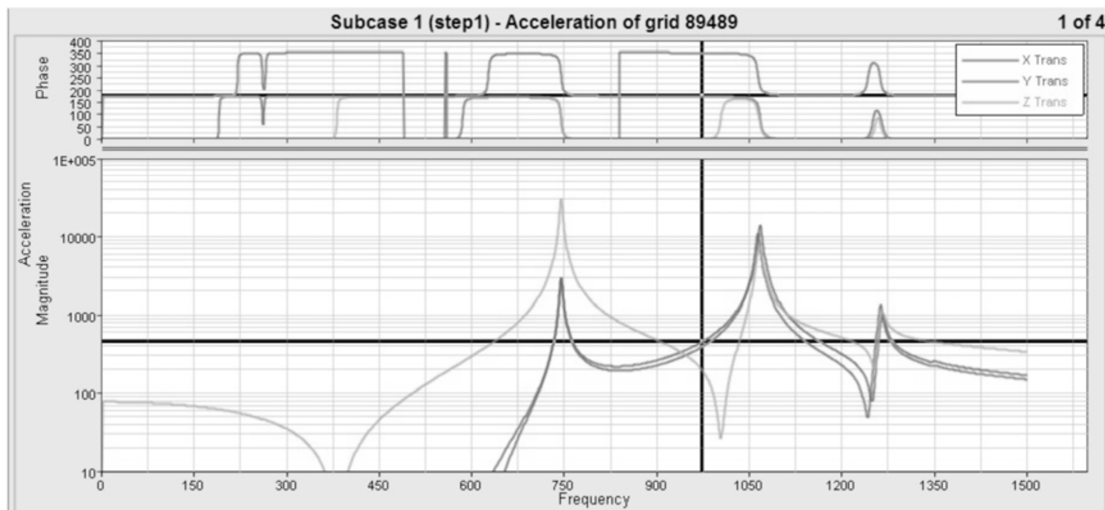


图 7-21　查看频率点的详细信息（二）

7.3.4 加速度激励的频率响应分析

本例讲解如何设置激励为加速度的模态法频率响应分析，并在 HyperGraph 中查看结果。在 RADIOSS（Bulk Data）中使用 SPCD 创建加速度，同时需要使用 SPC 约束住与 SPCD 中设置的相同自由度。如果模型中没有其他的约束，求解器将会自动使用惯性释放。

STEP 01 启动 HyperMesh，设置 RADIOSS（Bulk Data）用户配置文件，并载入 FRF（SPCD）.hm 文件

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 User Profiles 对话框。如果没有弹出，可以从工具栏中的 Preferences 下拉菜单进入。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

（4）在 File 下拉菜单中单击 open，弹出 open model 窗口。

（5）在光盘中找到 FRF（SPCD）.hm 文件并打开。

STEP 02 创建 SPCD 载荷集

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子面板。

（2）单击 loadcol name =，输入 SPCD。

（3）单击 color，在调色板中设置一种颜色。

（4）选择 no card image，单击 create，这样一个新的载荷集 SPCD 就被创建了。

（5）单击 return 返回。

（6）进入 Analysis 中的 constraints 面板，将 load types 切换成 SPCD。

（7）激活 nodes 选择框，选择 6 个 REB2 的中心主节点，如图 7-22 所示。

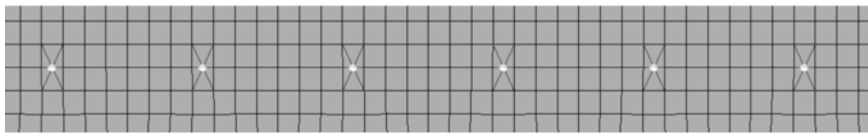


图 7-22　激励点

（8）仅选中 dof2，在等号后面输入 10，表示 10 个单位大小的激励。

（9）单击 create，完成 SPCD 载荷集的创建。

STEP 03 创建 SPC 载荷集

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子面板。

（2）单击 loadcol name =，输入 SPC。

（3）单击 color，在调色板中设置一种颜色。

（4）选择 no card image，单击 create。这样一个新的载荷集 SPC 就被创建了。

（5）单击 return 返回。

（6）进入 Analysis 中的 constraints 面板，将 load types 切换成 SPC。

（7）激活 nodes 选择框，选择 STEP 02 中选择的 6 个节点。

（8）同样仅选中 dof2，在=后面输入 0。

（9）单击 create，完成 SPC 载荷集的创建。

STEP 04 创建 TABLED1 载荷集

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子面板。

（2）单击 loadcol name =，输入 TABLED1。

（3）单击 color，在调色板中设置一种颜色。

（4）选择 card image→TABLED1，单击 create/edit，进入 TABLED1 卡片编辑界面。

（5）单击 TABLED1_NUM =，输入 2。上方界面发生变化，多出两个文本框。

（6）在 x（1）下输入 0，在 y（1）下输入 1；在 x（2）下输入 500，在 y（2）下输入 1。这样就通过（0,1）和（500,1）两个点描述一条幅值恒等于 1 的曲线。

（7）单击 return 返回。

STEP 05 创建 RLOAD2 载荷集

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子面板。

（2）单击 loadcol name =，输入 RLOAD2。

（3）单击 color，在调色板中设置一种颜色。

（4）选择 card image→RLOAD2，单击 create/edit，进入 RLOAD2 卡片编辑界面。

（5）单击两次 EXCITEID，载荷集列表被显示在左下角。

（6）单击 SPCD，并单击 return 返回。此时，EXCITEID 下方显示 1。

（7）单击两次 TB，载荷集列表被显示在左下角。

（8）单击 TABLED1，并单击 return 返回。此时，TB 下方显示 2。

（9）单击[TYPE]以激活，在其下方选择 ACCE，表示引用 SPCD 载荷集中的激励为加速度。

（10）单击 return 返回。

STEP 06 创建 FREQ1 载荷集

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子面板。

（2）单击 loadcol name =，输入 FREQ1。

（3）单击 color，在调色板中设置一种颜色。

（4）选择 card image→FREQi，单击 create/edit，进入 FREQi 卡片编辑界面。

（5）在编辑区域下方选中 FREQ1。

（6）在 F1 下方输入 10，表示第一个结果输出频率点为 10Hz。

（7）在 DF 下方输入 10，表示频率增量为 10Hz。

（8）在 NDF 下方输入 49，表示结果输出频率增加 49 次。

（9）单击 return 返回。

STEP 07 创建 EIGRL 载荷集

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子面板。

（2）单击 loadcol name =，输入 EIGRL。

（3）单击 color，在调色板中设置一种颜色。

（4）选择 card image→EIGRL，单击 create/edit，进入 EIGRL 卡片编辑界面。

（5）单击 [V2] 以激活，在其下方输入 1000，表示求解 1000Hz 以下所有的模态。为了保证精度，通常在做模态法频率响应分析时，求解模态频率范围（即截断频率）是扫频频率范围的两倍以上，即 EIGRL 卡片中设置的频率范围是 TABLED1 卡片中的频率范围的两倍以上。本例中，扫频频率范围是 0～500Hz，求解模态频率范围是 0～1000Hz。

（6）单击 return 返回。

STEP 08 创建载荷工况

本例到目前为止已经创建了 6 个载荷集，其中 SPCD 和 TABLED1 已经被 RLOAD2 引用，下面需要在工况控制段引用剩下的 4 个载荷集。本例中模型没有被约束，所以求解器会自动启动惯性释放。

（1）进入 Analysis 中的 loadsteps 面板。
（2）单击 name =，输入 FRF。
（3）将 type 切换成 freq.resp（modal），模态法频率响应分析。
（4）选中 SPC 复选框，单击=，选择 SPC 载荷集。
（5）选中 DLOAD 复选框，单击=，选择 RLOAD2 载荷集。
（6）选中 METHOD 复选框（STRUCT），单击=，选择 EIGRL 载荷集。
（7）选中 FREQ 复选框，单击=，选择 FREQ1 载荷集。
（8）单击 create，创建工况。
（9）单击 return 返回。

STEP 09 设置求解相关控制卡片和结果输出请求

（1）进入 Analysis 中的 control cards 面板。
（2）单击 next，找到 PARAM 卡片，单击进入卡片编辑界面。
（3）选中 G 复选框。
（4）单击 [G_V1] 以激活，输入 0.1。
（5）单击 return 返回。
（6）单击 prev，找到 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST 卡片，单击进入卡片编辑界面。
（7）激活编辑区域下方的 ACCELERATION，编辑区域发生变化。
（8）单击 ACCELERATION 后面 FORMAT（1）下面的选项，选择 H3D。
（9）单击 FORM（1）下面的选项，选择 REAL。
（10）单击 OPTION（1）下面的选项，选择 ALL。
（11）激活编辑区域下方的 DISPLACEMENT，编辑区域发生变化。
（12）单击 DISPLACEMENT 后面 FORMAT（1）下面的选项，选择 H3D。
（13）单击 FORM（1）下面的选项，选择 REAL。
（14）单击 OPTION（1）下面的选项，选择 ALL。
（15）单击 return 返回。
（16）单击 next，找到 OUTPUT 卡片，单击进入卡片编辑界面。
（17）单击 number_of_outputs，输入 3，编辑区域发生变化。
（18）将第一个 OUTPUT 后面 KEYWORD 下方的选项切换成 HGFREQ，FREQ 切换成 ALL。
（19）将第二个 OUTPUT 后面 KEYWORD 下方的选项切换成 OPTI，FREQ 切换成 ALL。
（20）将第三个 OUTPUT 后面 KEYWORD 下方的选项切换成 H3D，FREQ 切换成 ALL。
（21）单击两次 return 返回。

STEP 10 提交求解

（1）从 Analysis 页面进入到 RADIOSS 面板。

（2）在 input file 中单击 save as。

（3）选择 RADIOSS 模型的目录，在 File name 中输入模型名字 FRF（SPCD）.fem，单击 Save。

（4）单击 export options，选择 all。

（5）单击 run options，选择 analysis。

（6）单击 RADIOSS。

（7）这样就提交了 RADIOSS 任务。

STEP 11 查看结果

（1）打开 HyperGraph。

（2）单击 File→Open→Plot，弹出对话框。浏览至 STEP 10 求解路径，打开.h3d 文件。

（3）在 HyperGraph 操作面板区域的 Y Type 下，选择 Acceleration（Grids）。

（4）在右边的 Y Request 下，选择 ALL。

（5）在 Y Component 下，选择 MAG | Y。

（6）单击 Apply。所有节点的加速度响应都被显示在图形区域，可以根据需要挑选出关心的节点，单独分析。

（7）对位移响应的操作同上。

7.4 相关卡片

1．DLOAD 卡片

为频率响应分析定义一个动态载荷工况，该工况由 RLOAD1 和 RLOAD2 线性组合而成。或者为瞬态响应分析定义一个动态载荷工况，该工况由 TLOAD1 和 TLOAD2 线性组合而成。

DLOAD 卡片格式如表 7-1 所示。

表 7-1　DLOAD 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
DLOAD	SID	S	S1	L1	S2	L2	S3	L3	
	S4	L4	…	…	…	…	…	…	

DLOAD 卡片示例如表 7-2 所示。

表 7-2　DLOAD 卡片示例

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
DLOAD	5	1.0	2.0	101	2.0	102	2.0	103	
	-2.0	201							

DLOAD 卡片格式中各项的解释如表 7-3 所示。

表 7-3　DLOAD 卡片中各项的解释

项	内　　容
SID	载荷 ID 号。无默认值（整型>0）
S	缩放系数。无默认值（实型）
S#	缩放系数。无默认值（实型）
L#	RLOAD1 和 RLOAD2（或 TLOAD1 和 TLOAD2）的载荷 ID 号。无默认值（整型>0）

（1）动载的载荷集必须在 I/O 或 Subcase 段使用 DLOAD=SID 引用。
（2）定义的载荷矢量由式（7-12）给出：

$$\{P\}=S\sum_i Si\{P_i\} \tag{7-12}$$

（3）同一个 DLOAD 中的 L#不能重复。
（4）SID 不能和 RLOAD1、RLOAD2 或 TLOAD1、TLOAD2 的 ID 号重复。
（5）DLOAD 不能引用已经被别的 DLOAD 引用过的载荷 ID。
（6）RLOAD1、RLOAD2 或 TLOAD1、TLOAD2 只能通过 DLOAD 进行组合。
（7）该卡片在 HyperMesh 中是一个loadcollector。

2．RLOAD2 卡片

定义一个随频率变化的动载荷，用于频率响应的问题，形式见式（7-13）：

$$f(\Omega)=AB(\Omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\varphi(\Omega)+\theta-2\pi\Omega\tau)} \tag{7-13}$$

RLOAD2 卡片格式如表 7-4 所示。

表 7-4　RLOAD2 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
RLOAD2	SID	EXCITEID	DELAY	DPHASE	TB	TP	TYPE		

RLOAD2 卡片示例如表 7-5 所示。

表 7-5　RLOAD2 卡片示例

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
RLOAD2	5	3			7				

RLOAD2 卡片格式中各项的解释如表 7-6 所示。

表 7-6　RLOAD2 卡片中各项的解释

项	内　　容
SID	载荷集 ID 号。无默认值（整型> 0）
EXCITEID	DAREA 或 SPCD 选项的 ID 号，用于定义 A。无默认值（整型> 0）

（续）

项	内　容
DELAY	定义时间延时τ。如果τ是非零整数，表示 Bulk Data 项中用于定义τ的 DELAY 卡片 ID 号。如果τ是个实数，表示直接定义了τ的值，并且作用于该动态载荷激励的所有自由度 默认值=0（整型≥0，实型或空）
DPHASE	定义相位 θ。如果 θ 是非零整数，表示 Bulk Data 项中用于定义 θ 的卡片 ID 号。如果 θ 是个实数，表示直接定义了 θ 的值，并作用于通过该动态载荷项激励的所有自由度。默认值 = 0（整型≥0，或实型）
TB	定义 B（Ω）的 TABLED1、TABLED2、TABLED3 或 TABLED4 项 ID 号。无默认值（整型> 0）
TP	定义φ（Ω）的 TABLED1、TABLED2、TABLED3 或 TABLED4 项 ID 号，单位为度。默认值 = 0（整型≥0）
TYPE	确定动态激励的类型。默认值 = 0

（1）动态载荷集必须在 I/O 选项或者 Subcase 段用 DLOAD = SID 选择。

（2）如果 DELAY、DPHASE 和 TP 中的任何一个为空或 0，那么与之对应的τ、θ和φ（Ω）为 0。

（3）RLOAD1 载荷与 RLOAD2 载荷相结合只能通过指定一个 DLOAD 项实现。也就是说，RLOAD2 项的 SID 必须和 RLOAD1 项的不同。

（4）对于所有 RTLOAD1 和 RLOAD2 项的 SID 必须是唯一的。

（5）TYPE 确定动态激励类型。该项的有效输入及产生的动态激励的描述如表 7−7 所示。

表 7−7　动态激励类型

TYPE	描　述
0, L, LO, LOA, LOAD	施加载荷，EXCITEID 引用 DAREA 数据
1, D, DI, DIS, DISP	强迫位移，EXCITEID 引用 SPCD 数据
2, V, VE, VEL, VELO	强迫速度，EXCITEID 引用 SPCD 数据
3, A, AC, ACC, ACCE	强迫加速度，EXCITEID 引用 SPCD 数据

（6）当 EXCITEID 项使用 SPCD 时，模态空间会根据在每个 SPCD 自由度上施加静载的线性静力分析得到的位移矢量进行扩展。

（7）在 HyperMesh 中该卡片为loadcollector。

3．FREQ1 卡片

定义频率响应分析用的频率集，通过指定起始频率、频率增量和增量步数确定。

FREQ1 卡片格式如表 7−8 所示。

表 7−8　FREQ1 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
FREQ1	SID	F1	DF	NDF					

FREQ1 卡片示例如表 7−9 所示。

表 7-9　FREQ1 卡片示例

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
FREQ1	6	2.9	0.5	13					

FREQ1 卡片格式中各项的解释如表 7-10 所示。

表 7-10　FREQ1 卡片中各项的解释

项	内　　容
SID	频率集 ID 号。无默认值（整型>0）
F1	频率集中的第一个频率。无默认值（实型≥0）
DF	频率增量。无默认值（实型>0.0）
NDF	频率增量的个数。默认值 ＝1（整型>0）

（1）FREQ5 必须被 Subcase 段的 FREQUENCY＝SID 引用才能起作用。

（2）F1 和 DF 的单位是转/时间。

（3）该项定义的频率由式（7-14）给出：

$$f_i = F1 + DF(i-1) \tag{7-14}$$

其中，i =1～（NDF＋1）。

（4）所有具有相同 ID 号的 FREQi 卡片都会被使用。重复的频率将被忽略。如果 f_N 和 f_{N-1} 满足式（7-15），则 f_N 和 f_{N-1} 被认为是重复频率：

$$|f_N - f_{N-1}| < DFREQ|f_{MAX} - f_{N-MIN}| \tag{7-15}$$

DFREQ 是用户定义参数，$10^{-5} * f_{MAX}$ 和 f_{MIN} 是 FREQi 组合后得到的最大和最小激振频率。

（5）该卡片在 HyperMesh 中是一个 loadcollector。

4．SPCD 卡片

为静态分析定义一个强迫位移值，为动态分析定义一个强迫位移、速度或加速度，为热传导分析定义一个热边界条件。

SPCD 卡片格式如表 7-11 所示。

表 7-11　SPCD 卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
SPCD	SID	G	C	D	G	C	D		

SPCD 卡片示例如表 7-12 所示。

表 7-12　SPCD 卡片示例

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
SPCD	100	32	436	−2.6	5	1	+2.9		

SPCD 卡片格式中各项的解释如表 7-13 所示。

表 7-13　SPCD 卡片中各项的解释

项	内　　容
SID	静态载荷集的 ID 号（整型>0）
G	节点或标量点的 ID 号（整型>0）
C	全局坐标系的分量（6 >整数> 0，最多可以放置 6 个不同的数字，中间不能有空格）
D	对所有通过 G 和 C 指定的强迫运动值（实型）

（1）该项定义的自由度（G 和 C）必须同时参照一个 Bulk Data 段的 SPC 或者 SPC1，并在同一个工况中由 SPC 来选择。

（2）如果在线性静态或者稳态热传导分析中使用，必须在 subcase 段用 LOAD 选择。

（3）如果在同一个工况中使用，那么 D 的值将覆盖 Bulk Data 段的 SPC 指定的值。

（4）如果在动态分析中使用，载荷集 ID 号必须被 Bulk Data 段的 RLOAD1、RLOAD2、TLOAD1 或 TLOAD2 引用，载荷类型通过各卡片中的 TYPE 项指定。

（5）Bulk Data 段的载荷组合卡片 LOAD 不能包含 SPCD。

（6）在静态分析中施加强迫位移时等效于使用一个 SPC。对于静态和动态分析，当将 SYSSETTING I/O 选项中的 SPSYNTAX 设置为 CHECK（默认）或者是 STRICT 时，它对节点/分量对（G#/C#）的要求如下：当节点的参考是一个标量点（SPOINT）时，分量为 0 或空；当节点参考为结构节点（GRID）时，组件为> 1。当 SPSYNTAX 设置为 MIXED 时，它对网格/组件对（G#/C#）的要求如下：当分量为 0、1 或空时，节点参考既可以是一个标量点（SPOINT），也可以是结构节点（GRID），对标量点解释为 0，而对结构节点解释为 1；当分量大于 1 时，节点参考必须是结构网格（GRID）。

（7）在 HyperMesh 中该卡片为一个约束load。

7.5　本章小结

本章介绍了直接法和模态法频率响应分析的基本理论，3 种不同阻尼的设置方法，残余矢量的概念以及两种不同的残余矢量计算方法。瞬态响应是振动问题的直接反映，但是频率响应分析在许多情况下更有助于揭示振动问题的本质。频率响应分析的本质是结构模态被外界特定频率的激励激发出来，所以频率响应分析是模态分析和动载激励的组合，两者的物理意义是统一的。频率响应分析是解决振动问题的主要手段，同时频率响应分析也是整个 NVH 分析的基础。本书第 12 章将要介绍的 NVH 分析就是对频率响应分析的一种应用。

第 8 章

瞬态响应分析



本章将介绍瞬态响应分析相关的理论和软件设置。瞬态响应分析属于时域分析，计算结构在随时间变化的载荷作用下的响应，其典型应用如结构受到地震、风、爆炸载荷或者是汽车通过路面上的凹坑时的响应。使用有限元方法计算瞬态响应实际上只是在用户指定的时间点上计算结构的响应，所以计算结果也只能得到这些点的对应输出。

本章重点知识

8.1　瞬态响应分析基本理论
8.2　瞬态响应分析实例
8.3　相关卡片
8.4　本章小结

8.1 瞬态响应分析基本理论

瞬态响应分析的载荷可以是与时间相关的力、位移、速度和加速度。初始条件可以定义网格点的初始位移和初始速度。瞬态响应分析的结果是与时间相关的位移、速度、加速度、力、应力和应变等。

瞬态响应分析通过求解式（8−1）～式（8−3）包含以矩阵形式出现的初始条件的运动方程计算结构响应。

$$M\ddot{\mathrm{u}}+B\dot{\mathrm{u}}+K\mathrm{u}=P(t) \tag{8-1}$$

$$\mathrm{u}(t=0)=u_0 \tag{8-2}$$

$$\dot{\mathrm{u}}(t=0)=v_0 \tag{8-3}$$

其中，矩阵 K 是全局刚度矩阵，矩阵 M 是质量矩阵，矩阵 B 是阻尼单元确定的阻尼矩阵。初始条件是问题公式化的一部分并且仅适用直接法瞬态响应分析。运动方程使用 Newmark beta 方法在时间域上积分。求解需要定义时间步长和终止时间。

瞬态响应分析求解可使用直接法和模态法。选择直接法进行瞬态响应分析时运动方程应用 Newmark beta 方法直接求解。在瞬态响应分析中不能用复系数来表示阻尼。因此，结构阻尼需要转换成等效粘性阻尼。

阻尼矩阵 B 由式（8−4）中的 3 个部分组成：

$$B=B_1+\frac{G}{W_3}+\frac{1}{W_4}K_E \tag{8-4}$$

式中，B_1 为粘性阻尼器单元矩阵，G 是全局结构阻尼（PARAM, G），W_3 是全局结构阻尼转换成等效粘性阻尼所感兴趣的频率（PARAM, W_3），W_4 是单元结构阻尼转换成等效粘性阻尼所感兴趣的频率（PARAM, W_4），K_E 由结构单元阻尼系数 GE 确定。

瞬态响应载荷和边界条件在输入文件的 Bulk Data 段定义。它们必须在 SUBCASE 段使用 SPC 和 DLOAD 引用。直接法瞬态分析不能使用惯性释放。如果使用将会出错。瞬态响应分析仅能定义一个瞬态工况。初始条件必须被 SUBCASE 声明中的 IC 引用。分析的时间步长和终止时间必须被 SUBCASE 声明中的 TSTEP（TIME）引用。除了各种阻尼单元和材料阻尼，还可以使用 PARAM 和 G 来定义全局结构阻尼 G。

选择模态法进行瞬态响应分析时，首先执行模态分析来获得系统的特征值 $\lambda_i(\lambda_i=\omega_i^2)$ 和相应的特征向量。方程中 u 可以表达为特征向量 X 和模态响应 d 的内积，见式（8−5）：

$$u=Xd \tag{8-5}$$

无阻尼的运动方程通过特征向量变换到模态坐标下，见式（8−6）：

$$X^{\mathrm{T}}MX\ddot{\mathrm{d}}+X^{\mathrm{T}}KX\mathrm{d}=X^{\mathrm{T}}P \tag{8-6}$$

模态质量矩阵和模态刚度矩阵是对角矩阵。这样系统方程就简化成一组 d 的分量的非耦合方程，很容易求解。

有阻尼的运动方程见式（8−7）：

$$X^{\mathrm{T}}MX\ddot{\mathrm{d}}+X^{\mathrm{T}}KX\mathrm{d}+X^{\mathrm{T}}KX=X^{\mathrm{T}}P \tag{8-7}$$

这里，矩阵通常是非对角矩阵。因此，该耦合问题可以使用类似直接法求解，但方程包含更少的自由度。简化后的运动方程使用 Newmark beta 方法求解。

假如阻尼单独施加在各个模态点，方程依然是可以解耦的。这个通过阻尼表格 TABDMP1 来完成，表格中列出了阻尼值 g_i 相对的固有频率 f_i。

解耦后的方程见式（8-8）或式（8-9）：

$$m_i\ddot{\mathrm{d}}_i(t)+b_i\dot{\mathrm{d}}_i(t)+k_i\mathrm{d}_i(t)=p_i(t) \tag{8-8}$$

或者

$$\ddot{\mathrm{d}}_i(t)+2\zeta_i\omega_i\dot{\mathrm{d}}_i(t)+\omega_i^2\mathrm{d}_i(t)=\frac{1}{m_i}P_i(t) \tag{8-9}$$

式中，$\zeta_i=b_i/(2m_i\omega_i)$ 是模态阻尼系数，ω_i 是模态特征值。

可以定义 3 种类型的模态阻尼值 G_i（f_i）：G ——结构阻尼，$CRIT$ ——临界阻尼，Q ——损耗因子。它们的关系见式（8-10）～式（8-12）（与频率响应分析相同）：

$$G:\zeta_i=\frac{b_i}{b_{cr}}=\frac{g_i}{2} \tag{8-10}$$

$$CRIT:b_{cr}=2m_i\omega_i \tag{8-11}$$

$$Q:Q=\frac{1}{2\zeta_i}=\frac{1}{g_i} \tag{8-12}$$

通过在特征向量矩阵 X 上增加位移向量（基于动载荷的静态分析得到），模态分析的精确度可以大幅度地提高。这些向量常常被称为残余矢量，该方法称为模态加速方法。关于残余矢量的详细介绍请参考频率响应部分。

瞬态响应载荷和边界条件由输入文件的 Bulk Data 段定义。它们必须在 SUBCASE 中使用 SPC 申明和 DLOAD 申明引用。

如果使用模态法求解则不能定义初始条件。对于模态法需要一个 METHOD 申明去控制模态分析方法。分析时间步长和终止时间必须通过 SUBCASE 段的 TSTEP（TIME）引用。为了节省计算量，通过使用 SUBCASE 段的 EIGVRETRIEVE 申明可以重新获得之前保存的特征向量。还可以使用傅里叶变换，可以用频率响应分析方法来做瞬态分析。傅里叶变换方法可以用来解决结构模型在周期性载荷作用下的瞬态响应。这种方法的典型应用是汽车在颠簸路面上行进。

时间相关的载荷被转换成频域内，所有频率相关的矩阵计算都完成之后频率响应结果再转换到时域内。

结果是位移、速度、加速度、力、应力和应变，通常是时间相关的。

初始条件为矩阵形式的运动方程求解见式（8-13）：

$$M\ddot{\mathrm{u}}+B\dot{\mathrm{u}}+K\mathrm{u}=P(t) \tag{8-13}$$

这里矩阵 K 是刚度矩阵，矩阵 M 是质量矩阵，矩阵 B 是阻尼单元确定的阻尼矩阵。

载荷向量使用式（8-14）中的方法从时域转换成频域：

$$\tilde{P}(\Omega)=\int_{t=0}^{t}P(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\Omega t}\mathrm{d}t \tag{8-14}$$

响应结果见式（8-15）：

$$\tilde{u}(\Omega)=h(\Omega)\tilde{P}(\Omega) \tag{8-15}$$

式中，h（Ω）是单位载荷下的频率响应。

频率响应分析之后，可以通过式（8-16）还原为时间相关的响应：

$$u(t)=\frac{1}{\pi}\int_{\Omega=0}^{\infty}\mathrm{Re}\left[u(\Omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\Omega t}\right]\mathrm{d}\Omega \tag{8-16}$$

为了结果的准确性，需要注意以下几点。

（1）系统必须有合理的阻尼，太小的阻尼将导致不正确的结果。

（2）为了允许延迟，某些时间间隔的强制函数应该为 0。

（3）频率间隔应该遵循 $\Delta f \leqslant 1/\ \bar{f}_{pulse}+\bar{f}_{decay}$ 。

可以使用直接法和模态法求解。分析时间步长和终止时间必须通过 SUBCASE 段的 TSTEP（FOURIER）引用。

8.2 瞬态响应分析实例

8.2.1 支架的直接瞬态动力学分析

在本例子中将学习在 RADIOSS（bulk）中对一个支架模型（见图 8-1）进行直接瞬态动力学分析。用 HyperGraph 来观察在瞬态动载荷作用下的支架变形特性。

支架底部的两条腿将被约束。瞬态动载荷施加在顶部的栅格交叉点处，沿 Z 轴的负方向围绕孔中心的支架的平面。加载随时间变化的曲线如图 8-2 所示。直接瞬态分析总共运行 4s，被分成 800 个增量（时间步长为 0.005s）。模型同时也考虑到了结构阻尼。集中质量单元定义在 spider 的中心位置并输出孔中心位置上 z 方向的位移。

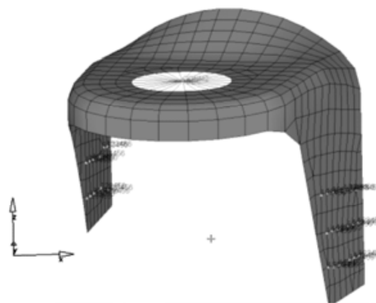


图 8-1　支架的有限元模型

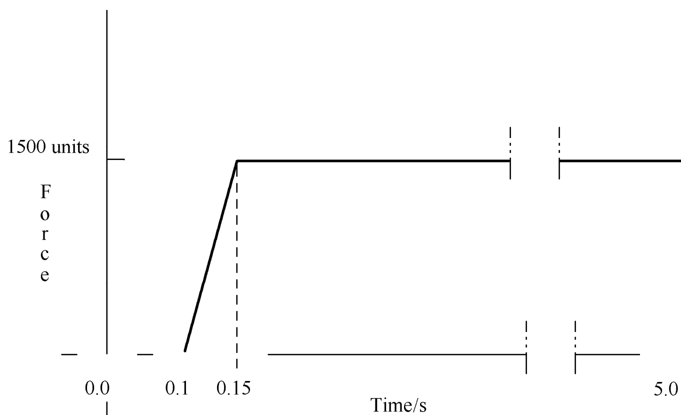


图 8-2　载荷增加的时间变化曲线

建立一个直接瞬态动力学分析的步骤如下。

（1）建立随时间变化的动载荷。

（2）建立瞬态分析的时间步长。

（3）建立包含上边所定义所有必须要的载荷的工况。

（4）定义结构的阻尼以及输出要求。

（5）运行直接瞬态动力学分析。

（6）使用 HyperGraph 进行后处理。

STEP 01 启动 HyperMesh 并且设置 RADIOSS（Bulk Data）用户配置文件

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 User Profiles 对话框。如果没有弹出，可以从工具栏中的 Preferences 下拉菜单进入。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

STEP 02 打开有限元模型文件 bracket_transient.hm

（1）在 File 下拉菜单中单击 open，弹出 open model 窗口。

（2）在光盘中找到 bracket_transient.hm 文件并打开。

STEP 03 建立 TABLED1（用来确定随时间变化的动载荷）

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子菜单。

（2）单击 loadcol name = 输入 tabled1。单击 color，在调色板中选择一种颜色。

（3）单击 card image=，在弹出的菜单中选择 TABLED1，如图 8-3 所示。



图 8-3　创建 TABLED1 卡片

（4）单击 create/edit。

（5）单击 TABLED1_NUM =并输入 4，然后按〈Enter〉键。这样就可以保证 TABLED1 有 4 个 x 和 4 个 y 输入。

（6）XAXIS 和 YAXIS 都设置成 LINEAR，分别在 x（i）和 y（i）中输入如下值，如图 8-4 所示。

	ID	XAXIS	YAXIS					
TABLED1	2	LINEAR	LINEAR					
	x(1)	y(1)	x(2)	y(2)	x(3)	y(3)	x(4)	y(4)
	0.000	0.000	0.100	0.000	0.150	1.000	5.000	1.000

图 8-4　设定 TABLED1 卡片参数

（7）单击 return 返回 Load Collectors 菜单，这样就创建了加载随时间变化的载荷集 TABLED1。

STEP 04 建立 TSTEP（瞬态时间步长确定了计算求解点和结果输出的时间间隔）

（1）单击 loadcol name =并输入 tstep。单击 color，在调色板中选择一种颜色。

（2）单击 card image =，在快捷菜单中选择 TSTEP，如图 8-5 所示。

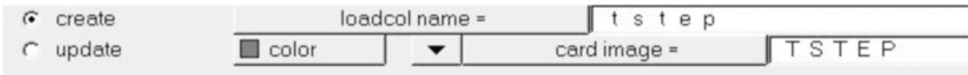


图 8-5　创建 TSTEP 卡片

（3）单击 create/edit。

（4）单击 TSTEP_NUM =并输入 1，然后按〈Enter〉键，这样就出现了 NTSTEP 的 N、DT 和 [NO] 输入区域。

（5）在 N 下输入 800，这就指定了时间步的数目。

（6）在 DT 下输入 0.005，这就制定了时间增量。

这样加载的总时间就是 800×0.005 = 4s。注意 NO 的默认值是 1.0，这是输出所要求的时间步。

（7）单击 return 返回 Load Collectors 菜单。

STEP 05 建立 DAREA 确定在支架上表面的作用力

（1）单击 loadcol name =，输入 darea。单击 color，在调色板中选择一种颜色。

（2）单击 card image 边上的切换按钮，选择 no card image。

（3）单击 create，然后单击 return 退出面板。

（4）单击 BCs→Create→Constraints，打开 Constraints 面板。

（5）单击 nodes，从弹出的菜单中选择 by sets。

（6）选择 force 并单击 select，这样就选中了属于 force 集合的节点。

（7）选中 dof3 复选框。

（8）在 dof3 复选框后面的文本框中输入–1500。

（9）单击 load types=，选择 DAREA，单击 create。这样就创建了施加所选择节点上沿 Z 轴负方向的 1 500 个单位的力，如图 8-6 所示。



图 8-6　创建 DAREA 激励

（10）单击 return 返回到主面板。

STEP 06 创建 TLOAD1（瞬态激励）

（1）单击 Load Collectors 按钮。
（2）单击 loadcol name =，输入 tload。单击 color，在调色板中选择一种颜色。
（3）单击 card image =，在弹出的菜单中选择 TLOAD1，如图 8-7 所示。



图 8-7　创建 TLOAD1 卡片

（4）单击 create/edit。
（5）双击 EXCITEID 并选择 DAREA 载荷集。
（6）双击 TID，选择先前所创建的载荷集 TABLED1（确定加载的时间历程）。

这种激励可以施加载荷（力或者力矩）、强制的位移、速度或者加速度。TLOAD1 卡片信息的 [TYPE] 区域确定了载荷的类型。默认的类型是 load。

（7）单击 return 返回到主面板。

STEP 07 创建载荷步，执行直接瞬态分析

（1）单击 Setup→Create→LoadSteps，打开 LoadSteps 面板。
（2）单击 name =，输入 transient。
（3）切换 type 选择 transient（direct）。
（4）选中 SPC 复选框，单击 SPC =，选择先前创建的载荷集 SPC。
（5）选中 DLOAD 复选框，单击 DLOAD =，选择先前创建的载荷集 TLOAD。
（6）选中 TSTEP 复选框，单击 TSTEP =，选择先前创建的载荷集 TSTEP。
（7）注意，TIME/FOURIER 切换设置为 TIME。
（8）单击 create，单击 return。

这样就创建了一个工况，为直接瞬态动力学分析定义了载荷和边界条件。

STEP 08 为瞬态动力学分析创建阻尼参数

（1）单击 Setup→Create→Control Cards，进入 Control Cards 面板。
（2）单击 next 进入更多的卡片。
（3）单击 PARAM 定义参数卡片。
（4）选中 G 复选框，单击 G_V1 输入 0.2。这个参数用来为直接瞬态动力学分析指定相同的结构阻尼系数。
（5）选中 W3 复选框，单击 W3_V1 输入 300。在瞬态分析中，这个参数用来将结构阻

尼转换为等系粘性阻尼。

（6）单击 return。

STEP 09 为瞬态动力学分析创建输出要求

（1）单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUESTS→DISPLACEMENT。

（2）保持 FORMAT（1）下方的区域空白。

（3）在 FORM（1）选择 BOTH。

（4）在 OPTION（1）选择 SID，出现一个黄色按钮 SID。单击 SID 并选择 center，单击 return。该节点集（set）表示孔中心节点 395，该节点和质量单元相连。

（5）单击 next 找到 OUTPUT。

（6）在 number_of_outputs 下输入 2。

（7）在 KEYWORD 选择 H3D 和 HGTRANS。

（8）两个选项的 FREQ 都选择 ALL。

（9）单击两次 return 退出 Control Cards 面板。

STEP 10 运行直接瞬态动力学分析

（1）进入 Analysis 页面中的 RADIOSS 面板。

（2）单击 Save as。

（3）选择保存文件的路径并输入文件名 bracket_transient_direct.fem。

（4）单击 Save。

（5）将 export options 切换到 all，run options 切换到 analysis，memory options 切换到 memory default，然后单击 RADIOSS 提交任务。

写入目标的默认文件夹有如下文件。

（1）bracket_transient_direct.html：分析的 HTML 报告，包含一些问题描述和分析结果列表。

（2）bracket_transient_direct.out：RADIOSS 输出文件，包含问题描述的详尽信息，优化的问题设定，估计运行时所需内存和硬盘的空间，每一步优化迭代和计算时间的信息，为每一个警告和错误重新检查文件。

（3）bracket_transient_direct.h3d：HyperView 压缩的二进制结果文件。

（4）bracket_transient_direct_tran.mvw：HyperView session 文件。该文件仅在瞬态分析完成时创建。该文件自动创建位移、速度和加速度图。

（5）bracket_transient_direct.stat：分析过程的摘要，为整个分析过程提供每一步的 CPU 信息。

STEP 11 查看节点 395 的后处理位移结果

（1）在 RADIOSS 面板中单击 HyperView 按钮，启动 HyperView。

（2）在下拉菜单中单击 File→Open→Sessions。

（3）在输出结果目标文件中选择 HyperView Session 文件 bracket_transient_direct_ tran.mvw，将出现如图 8-8 所示的提示。

（4）单击 Yes。

（5）单击 Close 关闭信息窗口。

这个文件自动地为位移结果创建平面图。

（6）单击 Curve Attributes 按钮，关闭曲线 X Trans 和 Y Trans。可以通过单独选择曲线（XTrans 和 YTrans），然后单击线的属性 Off 来完成，如图 8-9 所示。

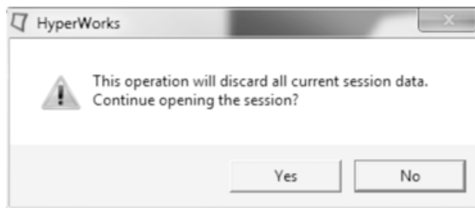


图 8-8　删除当前 session 中的数据

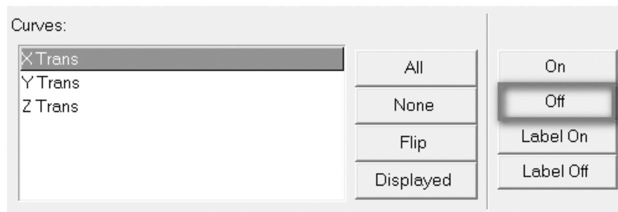


图 8-9　瞬态响应分析后处理

（7）单击按钮使节点 395 在 Y 轴有合适的大小（如 Z 向位移），如图 8-10 所示。

（8）也可以改变线的颜色或者曲线的属性。

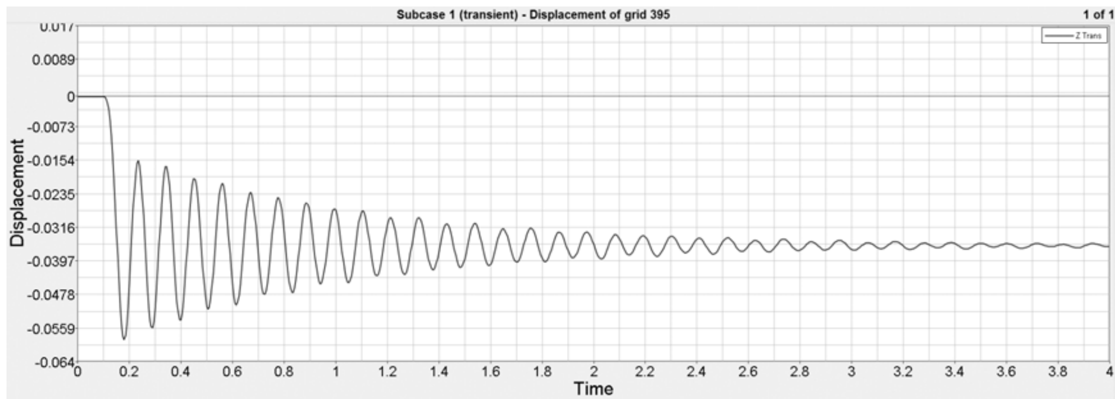


图 8-10　三脚架中心集中质量的 Z 向位移时间变化曲线

从图 8-10 可以看出，当在 Z 轴负方向加载时，节点 395 的位移也是在 Z 轴的负方向。因为模型中有结构阻尼，所以位移逐渐消失。

8.2.2 支架的模态法瞬态动力学分析

本例要求解的问题和 8.2.1 节完全相同，只是本例使用的是模态法求解。模态法的频率与提取的频率范围（eigrl）有很大关系。

本例用以下步骤来建立一个模态瞬态动力学分析。

（1）建立随时间变化的动载荷。

（2）定义瞬态分析的时间步长。

（3）在支架上方的平面上定义网格节点力。

（4）定义模态阻尼表。

（5）建立载荷集使用 Lanczos 方法提取 1000Hz 以内的模态。

（6）建立瞬态响应的动力学激励。

（7）建立包含以上所定义荷载的所有必要的 SUBCASE。

（8）详细说明输出要求。

（9）运行模态法瞬态动力学分析。

（10）使用 HyperGraph 进行结果后处理。

STEP 01 启动 HyperMesh 并且设置 RADIOSS（Bulk Data）用户配置文件

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 User Profiles 对话框。如果没有弹出，可从工具栏中的 Preferences 下拉菜单进入。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

STEP 02 打开有限元模型文件 bracket_transient.hm

（1）在 File 下拉菜单中单击 open，弹出 open model 窗口。

（2）在光盘中找到 bracket_transient.hm 文件并打开。

STEP 03 建立 TABLED1（table 用来确定随时间变化的动载荷）

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子菜单。

（2）单击 loadcol name=，输入 tabled1。单击 color，在调色板中选择一种颜色。

（3）单击 card image=，在弹出的菜单中选择 TABLED1，如图 8-11 所示。



图 8-11　创建 TABLED1 卡片

（4）单击 create/edit。

（5）单击 TABLED1_NUM =并输入 4，然后按〈Enter〉键。这样就可以保证 TABLED1 有 4 个 *x* 和 4 个 *y* 输入。

（6）XAXIS 和 YAXIS 都设置成 LINEAR，分别在 x（i）和 y（i）中输入如下值，如

图 8-12 所示。

图 8-12　设置 TABLED1 卡片参数

（7）单击 return 返回 Load Collectors 菜单，这样就创建了加载随时间变化的载荷集 TABLED1。

STEP 04 建立 TSTEP（瞬态时间步长确定了计算求解点和结果输出的时间间隔）

（1）单击 loadcol name =并输入 tstep。单击 color，在调色板中选择一种颜色。

（2）单击 card image =，在快捷菜单中选择 TSTEP，如图 8-13 所示。

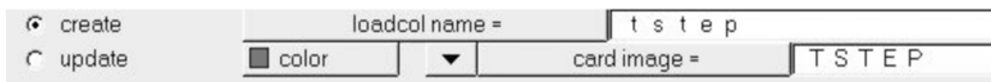


图 8-13　创建 TSTEP 卡片

（3）单击 create/edit。

（4）单击 TSTEP_NUM =并输入 1，然后按〈Enter〉键，这样就出现了 NTSTEP 的 N、DT 和 [NO] 输入区域。

（5）在 N 下输入 800，这就指定了时间步的数目。

（6）在 DT 下输入 0.005，这就制定了时间增量。

这样加载的总时间就是 800×0.005 = 4s。注意 NO 的默认值是 1.0，这是输出所要求的时间步。

（7）单击 return 返回 Load Collectors 菜单。

STEP 05 建立 DAREA，确定在支架上表面的作用力

（1）单击 loadcol name =，输入 darea。单击 color，在调色板中选择一种颜色。

（2）单击 card image 边上的切换按钮，选择 no card image。

（3）单击 create，然后单击 return 退出面板。

（4）单击 BCs→Create→Constraints，打开 Constraints 面板。

（5）单击 nodes，从弹出的菜单中选择 by sets。

（6）选择 force 并单击 select，这样就选中了属于 force 集合的节点。

（7）选中 dof3 复选框。

（8）在 dof3 复选框后面的文本框中输入–1500。

（9）单击 load types=，选择 DAREA，单击 create，这样就创建了施加所选择节点上沿 Z 轴负方向的 1 500 个单位的力，如图 8-14 所示。

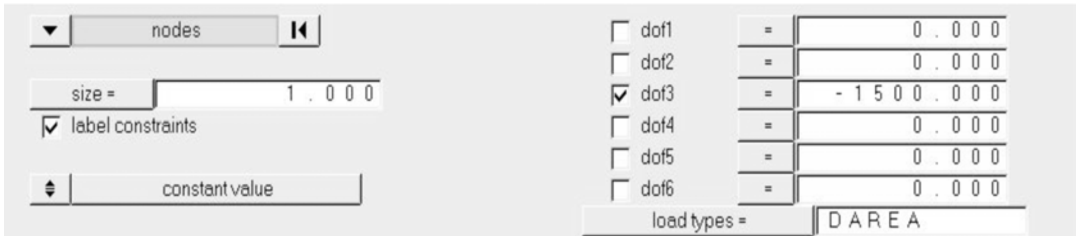


图 8-14　创建 DAREA 动载激励

（10）单击 return 返回到主面板。

STEP 06 创建 TABDMP1 卡片（模态阻尼）

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子菜单。

（2）单击 loadcol name =，输入 tabdmp1。单击 color，在调色板中选择一种颜色。

（3）单击 card image =，在快捷菜单中选择 TABDMP1。

（4）单击 create/edit。

（5）在 TABDMP1_NUM =文本框中输入 2。

这样在 TABDMP1 的两个输入区域中分别是频率（*f*）和阻尼（*g*）的值。

（6）在 TYPE 中，切换到 CRIT 指定临界阻尼，分别输入频率和阻尼的值，频率是 0～1 000Hz，而阻尼则是 0.02，如图 8-15 所示。

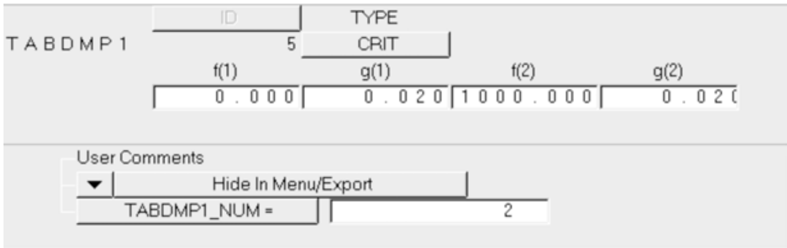


图 8-15　创建 TABDMP1 卡片

（7）单击 return 退出面板。

STEP 07 创建一个 EIGRL 载荷集去提取 1000 以内的模态

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子菜单。

（2）单击 loadcol name =，输入 eigrl。单击 color，在调色板中选择一种颜色。

（3）单击 Card image =，在弹出的菜单中选择 EIGRL。

（4）单击 create/edit。

（5）在 V1 中输入 0.0，在 V2 中输入 1000，保持 ND 区域为空白，提取 1 000Hz 以内的模态。

（6）单击 return。

STEP 08 创建 TLOAD1（瞬态动力学激励）

（1）单击 Load Collectors 按钮 。
（2）单击 loadcol name =，输入 tload。单击 color，在调色板中选择一种颜色。
（3）单击 card image =，在弹出的菜单中选择 TLOAD1，如图 8-16 所示。



图 8-16　创建 TLOAD1 卡片

（4）单击 create/edit。
（5）双击 EXCITEID 并选择 DAREA 载荷集。
（6）双击 TID，选择先前所创建的载荷集 TABLED1（确定加载的时间历程）。
这种激励可以施加载荷（力或者力矩）、强制的位移、速度或者加速度。TLOAD1 卡片信息的 [TYPE] 区域确定了载荷的类型。默认的类型是 applied load。
（7）单击 return 返回到主面板。

STEP 09 创建载荷步，执行模态瞬态动力学分析

（1）单击 Setup→Create→LoadSteps，打开 LoadSteps 面板。
（2）单击 name =，输入 transient。
（3）切换 type 选择 transient（modal）。
（4）选中 SPC 复选框，单击 SPC =，选择先前创建的载荷集 SPC。
（5）选中 DLOAD 复选框，单击 DLOAD =，选择先前创建的载荷集 tload1。
（6）选中 METHOD（Struct）复选框，单击 METHOD =，选择先前所创建的载荷集 EIGRL。
（7）选中 SDAMPING（Struct）复选框，单击 SDAMPING =，选择先前创建的载荷集 TABDMP1。
（8）选中 TSTEP 复选框，单击 TSTEP =，选择先前创建的载荷集 TSTEP。
（9）注意，TIME/FOURIER 切换设置为 TIME。
（10）单击 create→return。
这样就创建了一个工况，为模态瞬态分析定义了载荷、边界条件和阻尼。

STEP 10 为瞬态动力学分析创建输出要求

（1）单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUESTS→DISPLACEMENT。
（2）保持 FORMAT（1）下方的区域空白。

（3）在 FORM（1）选择 BOTH。在 OPTION（1）选择 SID，出现一个黄色按钮 SID。单击 SID 并选择 center，单击 return。该 set 表示孔中心节点 395，该节点和质量单元相连。

（4）单击 next 找到 OUTPUT。

（5）在 number_of_outputs 下输入 2。

（6）在 KEYWORD 选择 H3D 和 HGTRANS。

（7）两个 FREQ 的选项都选择 ALL。

（8）单击两次 return 退出 Control Cards 面板。

STEP 11 运行模态瞬态动力学分析

（1）进入 Analysis 页面中的 RADIOSS 面板。

（2）单击 Save as。

（3）选择保存文件的路径并输入文件名 bracket_transient_modal.fem。

（4）单击 Save。

（5）将 export options 切换到 all，run options 切换到 analysis，memory options 切换到 memory default，单击 RADIOSS 提交任务。

STEP 12 使用 HyperGraph 观察节点 395 的后处理位移结果（请参考 8.2.1 节）

8.3 相关卡片

TLOAD1 卡片

定义一个随时间变化的动态载荷或者是强迫运动，见式（8-17）：

$$f(t)=AF(t-\tau) \tag{8-17}$$

用于瞬态响应分析。

TLOAD1 卡片格式如表 8-1 所示。

表 8-1 TLOAD1 卡片格式

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
TLOAD1	SID	EXCITED	DELAY	TYPE	TID				

TLOAD1 卡片示例如表 8-2 所示。

表 8-2 TLOAD1 卡片示例

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
TLOAD1	5	7		LOAD	13				

TLOAD1 卡片格式中各项的解释如表 8-3 所示。

表 8-3　TLOAD1 卡片中各项的解释

项	内　　容
SID	载荷集 ID 号（整型> 0）
EXCITEID	DAREA 或者 SPCD 的 ID 号，用于定义{A}（整型> 0）
DELAY	定义时间延时τ。如果τ是非零整数，则表示 Bulk Data 项中定义了τ的 DELAY 卡的 ID 号。如果τ是实数，则表示直接定义了τ的值，并且用于作用于该动态载荷激励的所有自由度。默认值=0（整型≥0，实型或空）
TYPE	定义动态激励的类型（整型，字符型或空；默认=0）
TID	定义 $F(t)$ 的 TABLEDi 项的 ID 号（整型> 0）

（1）动态激励集必须被 Subcase 段的 DLOAD=SID 引用。

（2）动态激励的类型通过 TYPE（卡片第 5 项）指定，如表 8-4 所示。

表 8-4　动态激励的类型

TYPE	动态激励的类型
0, L, LO, LOA 或 LOAD	施加载荷（力或力矩）
1, D, DI, DIS 或 DISP	强迫位移，激励参考 SPC/SPCD 数据
2, V, VE, VEL 或 VELO	强迫速度，激励参考 SPC/SPCD 数据
3, A, AC, ACC 或 ACCE	强迫加速度，激励参考 SPC/SPCD 数据

（3）TYPE（第 5 项）同样确定了 EXCITEID 所使用的方式，过程描述如下。

- 如果 TYPE 指定的激励是施加载荷，那么 EXCITEID 必须选择 DAREA 项。
- 如果 TYPE 指定的激励是强迫运动，那么 EXCITEID 必须选择 SPCD 项。

（4）TLOAD1 载荷与 TLOAD2 载荷相结合只能通过指定一个 DLOAD 项实现。也就是说，RLOAD2 项的 SID 必须和 RLOAD1 项的不同。

（5）对于所有的 TLOAD1、TLOAD2、RTLOAD1 和 RLOAD2 项的 SID 必须是唯一的。

（6）如果 Fourier 分析选择了 TLOAD1 项，那么在 TLOAD1 项中的随时间变化的载荷要转变到频域内，然后分析就变为频率响应分析，但是结果和输出又被转换和打印到时域内。

（7）如果 DELAY 为空或者为 0，那么时间延迟τ为 0。

（8）当 EXCITEID 项使用 SPCD 时，模态空间会根据在每个 SPCD 自由度上施加静载的线性静力分析得到的位移矢量进行扩展。

（9）在 HyperMesh 中该卡片为loadcollector。

8.4　本章小结

本章介绍了直接法瞬态响应分析、模态法瞬态响应分析和基于傅里叶变换的瞬态响应分析的基本理论。这些方法都属于隐式有限元分析。本书后半部分介绍的 BLOCK 模块的显式有限元分析方法的主要应用领域也是对瞬态过程进行分析。隐式与显式处理瞬态响应问题的主要区别在于隐式算法总是稳定的，而显式算法的稳定性需要通过时间步长来保证，即保证一个时间步长内应力波不会越过一个单元。因此，隐式方法在处理时间历程很长的问题上有一定优势。隐式算法对应力应变等二次结果的计算精度相对较高而且得到的是收敛解。显式算法的优点是，它具有更好的稳健性，计算资源更省，能够处理复杂的接触，鲁棒性也更好。

第 9 章

响应谱分析和随机振动分析



响应谱分析（RSA）是一种用于估计结构在瞬态历程中最大响应的分析技术，如建筑结构的地震分析或轮船的爆炸冲击分析。和传统的瞬态响应分析相比，响应谱分析的优点是简单和经济。随机响应分析关心的是结构在随机载荷作用下的响应功率谱密度。

本章重点知识

9.1　响应谱分析基本理论
9.2　随机响应分析（随机振动）基本理论
9.3　分析实例
9.4　本章小结

9.1 响应谱分析基本理论

响应谱分析（RSA）是一种用于估计结构在瞬态历程中最大响应的技术，可以通过响应谱分析得到结构最大位移、最大应力和最大力。响应谱分析技术结合了给定动载的响应谱和模态分析结果。通过响应谱分析不能得到响应的时间历程结果。

响应谱描述的是单自由度系统在给定动态荷载下的最大响应和自然频率之间的关系。它们可以用于计算每一阶模态下的结构最大模态响应，然后用一些方法（如绝对值的和或者完全二次组合（CQC））组合这些模态最大响应值来估计结构响应的峰值。

相对于传统的瞬态分析而言，RSA 是一种简单且计算代价较低的峰值响应近似方法。其主要的计算量在于获得足够的模态阶数，以表达输入激励和结果响应的完整频率段。响应谱通常在设计规范中给出。

1．模态分析

结构自由振动的平衡方程可以归结为式（9−1）：

$$\left(K-\lambda M\right)\phi=0 \tag{9−1}$$

式中，（K）是结构刚度矩阵，（M）是质量矩阵，不考虑阻尼。

求解特征值问题得到 n 个特征值λ_i，n 是系统的自由度数。向量$\{\Phi_i\}$是与特征值对应的特征向量。

特征值问题使用 Lanczos 或者 AMLS 方法求解。求解过程只是求解一些低阶的特征值而无需求解全部特征值。特征值分析的结果是进行响应谱分析的基础。

RSA 分析与模态分析求解可以一次完成，也可以先用 Lanczos 或者 AMLS 方法求解并保存特征值和特征向量（使用 EIGVSAVE），然后在 RSA 分析中直接引用（使用 EIGVRETRIEVE）。

2．模态组合

把每一阶模态假想为一个单自由度系统。每个自由度的瞬态响应为式（9−2）：

$$u_k=\sum_i \varphi_{ik}\psi_i X \tag{9−2}$$

式中，$\{\varphi\}$是特征向量，$\{\psi\}$是模态参与因子，（X）是响应谱。

对于加速度产生的载荷，模态参与因子可以表示为式（9−3）：

$$\psi_i=-\left(\varphi_i\right)^{\mathrm{T}}\left(M\right)\{T\} \tag{9−3}$$

式中，$\{\varphi\}$是特征向量，（M）是质量矩阵，$\{T\}$是由激励引起的刚体位移。

在 ABS 模态组合方法中，峰值响应估计为式（9−4）：

$$u_k=\sum_i\left|\varphi_{ik}\right|\left|\psi_i X\right| \tag{9−4}$$

在 CQC 模态组合方法中，峰值响应估计为式（9−5）：

$$u_k=\sqrt{\sum_m\sum_n v_m\rho_{mn}v_n} \tag{9−5}$$

v_m是和模态 m 相关的模态响应，ρ_{mn}是交叉模态系数。

3．方向合并

为了估计在不同方向动载激励作用下的峰值响应，不同方向的峰值响应可以合并为总的

峰值响应。方法可以使用 ALG（代数方法）和 SRSS（平方和的平方根）。

4．SUBCASE 定义

响应谱分析（RSA）的 SUBCASE 可以通过 ANALYSIS=RSPEC 清楚地指定，也可以由任何包含 RSPEC 数据项的 SUBCASE 含蓄地指定（当没有 ANALYSIS 项时）。

响应谱分析（RSA）的 SUBCASE 定义可以识别下列数据项。

（1）METHOD：参考一个实特征值提取卡片（EIGRL）。只支持 METHOD（STRUCTURE），该项是必须的。

（2）RSPEC：参考一个 Bulk Data 段的 RSPEC 卡片，用于定义组合规则、激励 DOF 和响应谱的输入。该项是必须的。

（3）SDAMPING：参考 Bulk Data 段的阻尼表（TABDMP1）以定义模态阻尼。该项是必须的。

（4）SPC：参考一个 Bulk Data 段的单点约束（SPCADD、SPC 和 SPC1）。对于 RSA 分析只需要在激励自由度上使用 SPC 约束，其他自由度可以用 SPC 约束（同其他分析类型一样）。

（5）MPC：参考 Bulk Data 段的多点约束（MPCADD或MPC）。

5．Bulk Data 段

对于 RSA 分析特别重要的 Bulk Data 卡片如下。

（1）RSPEC：指定合并规则、激励 DOF 和参考的输入谱。

（2）DTI 和 SPECSEL：定义响应谱。

（3）EIGRL：定义实特征值提取参数。

（4）PARAM、LFREQ 和 PARAM、HFREQ：定义感兴趣的特征值提取范围。

（5）TABDMP1：指定模态阻尼。

（6）SPC、SPC1和SPCADD：指定激励施加位置及其他约束施加位置。

输入文件示例：

```
SUBCASE 100
RSPEC = 2
SPC = 5
SDAMPING = 12
METHOD = 24
$
BEGIN BULK
$
PARAM,LFREQ,0.1
PARAM,HFREQ,1000.
EIGRL,24,0.0,1000.
RSPEC,2,ABS,CQC,0.1
,99,2.0,1.0,0.0,0.0
DTI,SPECSEL,99,A,2,0.,3,0.02,
,4,0.04,ENDREC
TABDMP1,12,…
TABLED1,2
```

```
+,…
TABLED1,3
+,…
TABLED1,4
+,…
ENDDATA
$
```

6．输出

关心的 RSA 结果包括最大位移应力和力。可以分别通过 I/O 选项的DISPLACEMENT、STRESS和FORCE输出。

9.2　随机响应分析（随机振动）基本理论

当结构受到非确定性的连续载荷激励时，可以使用随机响应分析。常见的非确定性载荷有飞机结构的湍流、汽车的路面激励和结构的噪声载荷等。

复频率响应问题可以通过直接法或模态法频率响应分析求解。如果 $H_{xa}(f)$和 $H_{xb}(f)$是第 x 个自由度分别在载荷工况 a 和 b 作用下的复频率响应（位移、速度或加速度），则第 x 个自由度的功率谱密度 $R_x(f)$可以表示为式（9−6）：

$$R_x\left(f\right)=H_{xa}\left(f\right)S_{ab}\left(f\right)H_{xb}^{HC}\left(f\right) \tag{9-6}$$

$S_{\mathrm{ab}}(f)$是两个源的功率谱密度。其中，源 a 是激励工况，b 是加载工况。如果 $S_{\mathrm{a}}(f)$是某个源单独的功率谱密度，则由工况 a 引起第 x 个自由度响应的功率谱密度可以表示为式（9−7）：

$$R_x\left(f\right)=\left|H_{xa}\left(f\right)\right|^2 S_a\left(f\right) \tag{9-7}$$

两个不同的源（$a\neq b$）的互谱密度 $S_{\mathrm{ab}}(f)$可能是一个复数。由工况 a 和 b 引起第 x 个自由度响应的功率谱密度可以表示为式（9−8）：

$$R_x\left(f\right)= H_{xa}\left(f\right)S_{ab}\left(f\right)H_{xb}^{HC}\left(f\right) \tag{9-8}$$

HC 表示共轭复数。总的功率谱密度是所有单独载荷工况和交叉载荷工况引起的功率谱密度之和。

变量 $x(t)$的自相关函数 $A_x(\tau)$由式（9−9）定义：

$$A_x\left(\tau\right)=\lim_{\tau\to\infty}\int_{-\tau/2}^{\tau/2}x\left(t\right)x\left(t+\tau\right)\mathrm{d}t \tag{9-9}$$

$x(t)$的方差$\sigma^2(x)$等于 $A_x(0)$。方差$\sigma^2(x)$可以表示为功率谱密度 $S_x(f)$的函数，见式（9−10）：

$$A_x\left(0\right)=\sigma^2\left(x\right)=\int_{-\infty}^{\infty}S_x\left(f\right)\mathrm{d}f \tag{9-10}$$

响应 $x(t)$的均方根可以用式（9−11）表示：

$$x_{RMS}=\sqrt{\int_{-\infty}^{-}S_x\left(f\right)\mathrm{d}f} \tag{9-11}$$

自相关函数和功率谱密度互为傅里叶变换，因此自相关函数可以用式（9−12）表示：

$$A_x(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}S_x(f)\exp(i2\pi f\tau)\mathrm{d}f \tag{9-12}$$

随机振动可能导致材料失效。疲劳循环的周期数通过振动持续时间乘以正零相交最大次数得到。正零相交最大次数由式（9-13）计算：

$$P_c=\left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty}f^2S_x(f)\mathrm{d}f}{\int_{-\infty}^{\infty}S_x(f)\mathrm{d}f}\right)^{0.5} \tag{9-13}$$

如果存在XYPLOT、XYPEAK或XYPUNCH输出请求，则均方根和正零相交最大次数将被输出到*.peak 文件中去。

1．随机响应分析设定

随机响应分析通过 fem 文件的 SUBCASE 段的RANDOM项激活。该项引用 Bulk Data 段的RANDPS和RANDT1用于随机响应分析。谱密度通过 RANDPS 输入，RANDPS 指向一个TABRND1Bulk Data 项，TABRND1包含不同频率下载荷的功率谱密度。Bulk Data 段的RANDT1 描述了自相关函数的时长。每个频率响应 SUBCASE 的载荷可以不同，但是所有频率响应 SUBCASE 必须引用相同的频率数据。

2．随机响应分析输出

随机响应分析可以设定 3 类输出请求。这些输出请求位于输入文件的 I/O 选项段。3 个控制卡片如下。

（1）XYPEAK：生成一个.peak 文件，包含输出信息汇总。

（2）XYPLOT：生成一个 HyperGraph 的 session 文件（_rand.mvw文件）及输出请求的相关数据文件（.rand文件），同时也生成.peak 文件。

（3）XYPUNCH：生成一个输出请求的.pch文件，同时也生成.peak 文件。

这些输出请求与其他 RADIOSS 和 OptiStruct 输出请求的不同之处在于，它们可以在相同行中进行合并。

格式如下：

Operation,Curve-type,Plot-type/Grid（Component）list

Operation 可以是 XYPLOT、XYPUNCH 和 XYPEAK 的任意组合。

Curve-type 可以是 DISP、VELO 或 ACCE，分别表示请求位移、速度及加速度的输出。Plot-type 可以是 PSDF 或 AUTO，分别表示请求功率谱密度和自相关函数的输出。

Grid（Component）list 必须出现在“/”后面，每一项用逗号分开，每一项可以由 GRID 或 SPOINT ID 紧跟一个带括号的分量（T1、T2、T3、R1、R2 或 R3）组成。如果是SPOINTs，则分量必须为 1。

另外，可以用 TCURVE（plot 标题）、XTITLE（*X* 轴标题）和 YTITLE（*Y* 轴标题）控制绘图的标题和坐标轴。如果没有这些控制选项，则 titles 和 labels 将使用默认值生成。

示例 1

请求输出 GRIDs 3 和 6 的 T2 速度分量的随机响应输出，结果为 HyperGraph session 文件：

XYPLOT, VELO, PSDF / 3（T2）, 6（T2）

示例 2

请求输出 GRID 223 的 R3 位移分量的自相关函数的随机响应到.peak 文件：

XYPEAK, DISP, AUTO / 223（T3）

示例 3

请求 GRIDS 8 和 9 的 T1 和 T2 分量的所有格式的加速度 PSDF 随机响应输出：

XYPEAK, XYPLOT, XYPUNCH, ACCE, PSDF / 8（T1）, 9（T1）, 8（T2）, 9（T2）

9.3 分析实例

9.3.1 响应谱分析实例

本实例演示如何进行响应谱分析。这种分析通常被用来估算结构受到动态激励下的响应峰值。响应谱分析需要给定动态的响应谱和模态分析的结果进行峰值的评估。

所使用的模型如图 9-1 所示。该模型为一个建筑结构，使用实心圆截面的 CBEAM 单元来模拟。约束建筑结构基础的所有自由度，并且在结构全局坐标 *Z* 方向施加激励。

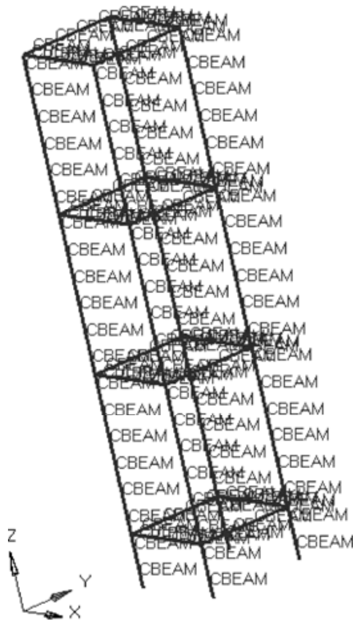


图 9-1　建筑结构的 hm 模型

STEP 01 启动 HyperMesh，选择 RADIOSS（Bulk Data）用户模板，并打开模型 building_ResponseSpectrumAnalysis.hm

模型使用 CBEAM 单元建立，同时 PBEAML 属性和 MAT1 材料已经设置好。用于梁和材料属性的单位分别为力 N，长度 mm，质量 t。

STEP 02 创建 EIGRL 卡片

定义 EIGRL 卡片用于计算模型的固有模态。

（1）单击 Load Collectors 按钮 。

（2）在 create 子面板，输入 eigrl_card 作为载荷集的名字。

（3）单击 card image =按钮，选择 EIGRL。

（4）单击 create/edit 创建和编辑 EIGRL 卡片。

（5）单击[ND]并输入 10。

（6）单击 return 返回 create 子面板。

（7）再次单击 return 退出 Load Collectors 面板。

STEP 03 创建约束

（1）单击 Load Collectors 按钮 。

（2）在 create 子面板, 输入 load collector 的名字 constraints，选择 no card image 并单击 create。

（3）进入 Analysis 面板。

（4）单击 constraints。

（5）在 create 子面板中，确保选项是 nodes，单击 nodes 并选择模型底面的 4 个节点，如图 9-2 所示。

（6）选中 dof1～dof6 复选框，输入 0.000，确认 load types 是 SPC，单击 create。

（7）单击 return 退出 constraints 面板。

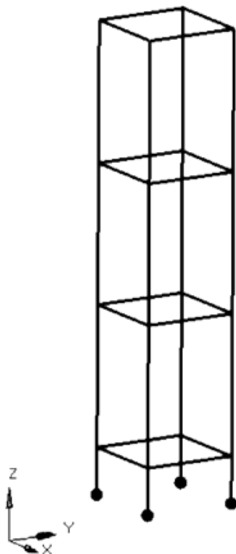


图 9-2　定义约束所选择的点

STEP 04 使用 TABLED1 卡片定义输入响应谱

（1）进入 Utility Menu。如果 Utility Menu 没有显示，单击 View→Utility Menu，如图 9-3 所示。

（2）在 Utility Menu 的底部，单击 FEA 面板。

（3）在 Tools 下单击 TABLE Create。

（4）在 Options 下选择 Import Table，并且在 Tables 中选择 TABLED1。

（5）单击 Next。

（6）在 Options 下选择 Create New Table。

（7）在 Name 文本框中输入 tabled1_card。

（8）单击 Browse，Files of type 改变为 CSV（*.csv），选择位于文件夹的文件 sourceFileTABLED1.csv（它包含 x 和 y



图 9-3　显示 Utility Menu

值，用于定义响应谱输入，坐标系中 *X* 轴是加速度，*Y* 轴是频率）。

（9）单击 Open。如果 Import TABLED1 图形用户窗口是最小化的，那么在工具栏上单击。

（10）在 Import TABLED1 图形用户窗口中单击 Apply，这时会显示 TABLED1 卡片被创建的信息提示。

（11）单击消息框中的 OK。

（12）在 Import TABLED1 图形用户窗口中，单击 Exit。

（13）如果想查看上面创建的与 TABLED1 卡片相对应的曲线图，在 FEA 面板的 Utility 菜单栏中打开 TABLE Create。选择 Create/Edit Table，对于 Tables，选择 TABLED1，单击 Next。对于 Options，选择 Edit Existing Table，与之相对应的 Select 选择 tabled1_card。单击 Plot，如图 9-4 所示。在看完曲线图之后，在 Plot 视窗中单击 Close，并在 Create/Edit TABLED1 图形用户窗口中单击 Exit。

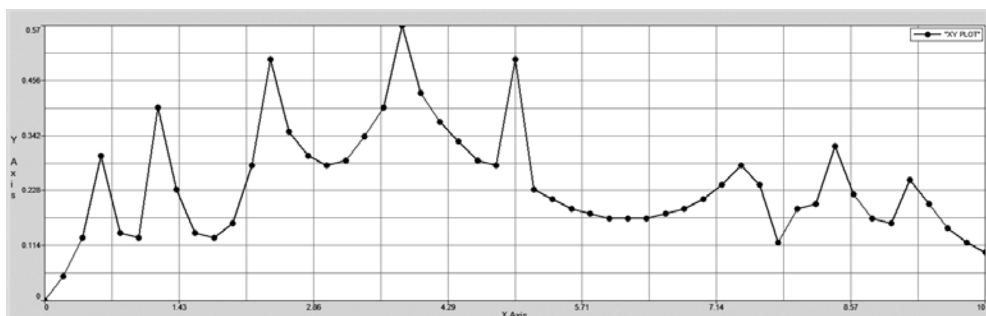


图 9-4　TABLED1 卡片的曲线图

STEP 05 定义 DTI,SPECSEL 卡片

DTI，SPECSEL 卡片通常用来指定与输入响应谱关联的谱的类型和阻尼值，使用前一步定义的 TABLED1 卡片来定义。

（1）单击 Load Collectors 按钮。

（2）在 create 子面板中，输入 dti_card 作为载荷集的名字。

（3）单击 card image =，选择 DTI 并单击 create/edit。

（4）在 TYPE 下选择 A，因为输入响应谱是加速度 *vs* 频率的曲线。

（5）单击两次 TID（1）并选择 tabled1_card。

（6）在 DAMP（1）中输入 0.02。阻尼值是以临界阻尼的比例来定义的。

（7）单击 return 退出面板。

STEP 06 定义 RSPEC 卡片，用于指定响应谱分析参数

（1）单击 Load Collectors 按钮。

（2）在 create 子面板中，输入 rspec_card 作为载荷集的名字。

（3）单击 card image =，选择 RSPEC 并单击 create/edit。

（4）对于方向合并方法 DCOMB，选择 ALG。

（5）对于模态组合方法 MCOMB，选择 SRSS。
（6）单击[CLOSE]并在文本框中输入 1.000。
（7）对于 RSPEC_NUM_DTISPEC 输入 1。
（8）单击两次 DTISPEC（1） 并选择 dti_card。
（9）对于 SCALE（1）输入 9800.0。
（10）因为对于结构的激励方向是沿全局坐标 *Z* 方向，所以分别在 X（0,0）中输入 0.0，在 X（0,1）中输入 0.0，在 X（0,2）中输入 1.0。
（11）单击 return 退出面板。

STEP 07 为结构定义模态阻尼

（1）单击 Load Collectors 按钮 。
（2）在 create 子面板中，输入 tabdmp1_card 作为载荷集的名字。
（3）单击 card image =，选择 TABDMP1 并单击 create/edit。
（4）对于 TYPE 选择 CRIT。
（5）对于 TABDMP1_NUM 输入 2。
（6）分别对 f（1）、g（1）、f（2）和 g（2）输入值 0.0、0.02、50.0 和 0.02。
（7）单击 return 退出面板。

STEP 08 定义 PARAM 卡片

（1）进入 Analysis 中的 control cards 面板，单击 next，单击 PARAM 面板。
（2）选中 COUPMASS 复选框，并选择 YES，这样就可以在特征值分析中使用耦合质量矩阵法。
（3）选中 EFFMASS 复选框，并选择 YES，这样就可以在.out 文件中计算和输出模态参与因子和有效质量。
（4）单击 return 退出面板。

STEP 09 定义输出要求

系统默认会输出位移。
（1）输出应力，进入 Analysis 中的 control cards 面板。
（2）单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST，选中 STRESS。
（3）对于 OPTION（1），选择 ALL。
（4）单击 return 两次退出 control cards 面板。

STEP 10 定义响应谱分析的载荷步

（1）进入 Analysis 中的 loadsteps 面板。

（2）在 name =文本框中输入 response_spec。

（3）type 选择 response spectrum。

（4）选中 SPC 复选框，单击 = 并选择载荷集 constraints。

（5）选中 RSPEC 复选框，单击 = 并选择载荷集 rspec_card。

（6）选中 METHODS（STRUCT）复选框，单击 = 并选择载荷集 eigrl_card。

（7）选中 SDAMPING（STRUCT）复选框，单击 = 并选择载荷集 tabdmp1_card。

（8）单击 create 创建载荷步。

（9）单击 return 退出 loadsteps 面板。

STEP 11 提交任务

（1）进入 Analysis 页面中的 RADIOSS 面板。

（2）单击 input file 后面的 Save as，弹出一个 Save file 浏览器窗口。

（3）选择要保存的文件的位置，并且在 File name 处输入一个文件名。注意，请将文件保存在安装目录以外的文件夹。

（4）单击 Save。

（5）将 export options 切换为 all，run options 切换为 Analysis，memory options 切换为 memory default。单击 Radioss 提交任务。

STEP 12 查看结果

（1）如果分析顺利完成，那么可以在 RADIOSS 面板上单击 HyperView。这样就启动了 HyperView 并且加载了分析的模型和结果文件。

（2）在 HyperView Results 浏览器中展开 Results 文件夹，然后扩展 Vector 文件夹并且通过选择 Displacement 下的 Mag 显示位移云图结果，如图 9-5 所示。

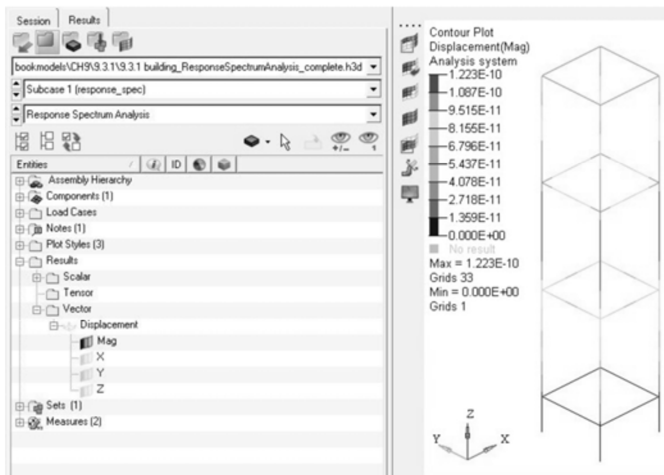


图 9-5　位移云图

（3）在 Results 下展开 Scalar 文件夹绘制应力云图，展开 Element Stresses （1D）并绘制你想得到的应力云图。图 9-6 所示是 CBAR/CBEAM Long. Stress SAMAX 的云图。

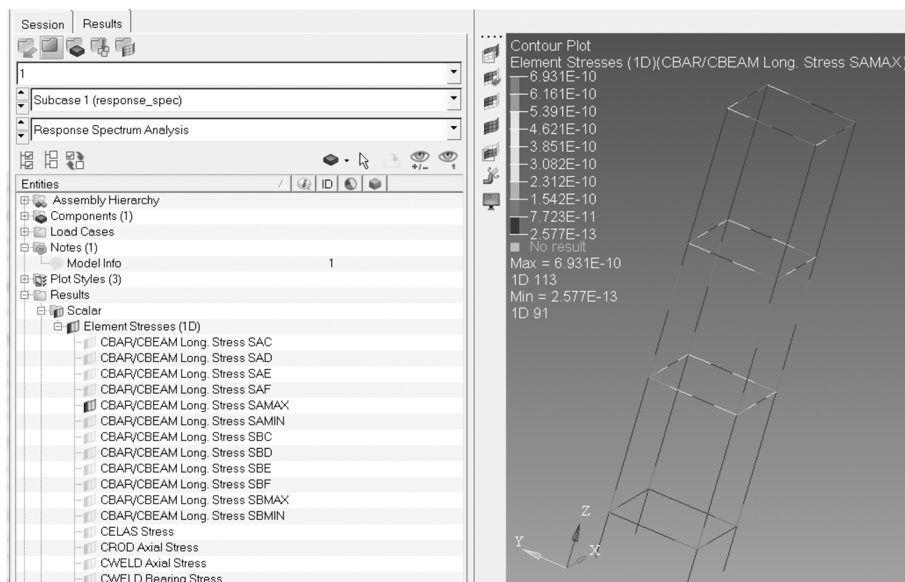


图 9-6　应力云图

9.3.2　随机响应分析实例（一）

本实例介绍如何在已有的频率响应分析模型上进行随机响应分析。平板有两个频率变化的载荷激励，使用直接法建立频率响应分析。

在.rand 文件中输出节点 19 位移的 PSD（功率谱密度），在.peak 文件中输出 PSD 的峰值和 RMS（均方根值）。PSD 和 RMS 应力结果在.op2 文件输出并在 HyperView 中进行后处理。

STEP 01　启动 HyperMesh，设置 RADIOSS（Bulk Data）用户模板，并打开文件 direct_psd.hm。

这样就打开了 direct_psd.hm 数据，如图 9-7 所示。

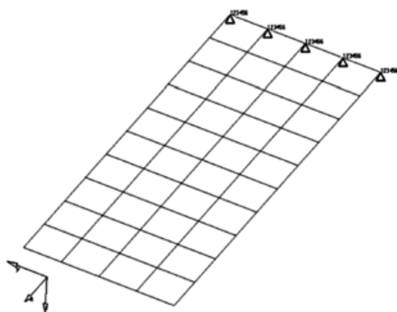


图 9-7　分析模型

这个模型的频率响应分析已经建立，平板的中一边夹紧而在另一边施加载荷（两种不同的加载，所以有两个工况）。加载频率用 FREQ1 卡片确定，频率从 20～1000Hz，增量是 20。两个工况都施加同样的加载频率。

STEP 02 建立载荷集 RANDPS 和 TABRND1

在这一步骤中，通过 RANDPS 卡片定义两个独立的工况（自谱）PSDF 和一个耦合工况（互谱）PSDF（意味着两个工况是相关的）。RANDPS 将引用 TABRNDi 类型的表格。

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子菜单。

（2）单击 loadcol name =，输入 tabrnd1。

（3）单击 card image=，在弹出菜单中选择 TABRND1。

（4）单击 create/edit 进入 TABRND1 卡片编辑面板。

（5）输入参数，如图 9-8 所示。

	ID	XAXIS	YAXIS					
TABRND1	60	LOG	LOG					
	f(1)	g(1)	f(2)	g(2)	f(3)	g(3)	f(4)	g(4)
	19.999	0.100	20.000	0.100	1000.00	0.100	1000.10	0.100

User Comments
Hide In Menu/Export
TABRND1_NUM = 4

图 9-8　创建 TABRND1 卡片

（6）单击 return 返回到 create 面板。

（7）在 loadcol name =文本框中输入 randps。

（8）单击 card image = 并选择 RANDPS。

（9）单击 create/edit 进入 RANDPS 卡片编辑面板。

（10）要定义 3 个 RANDPS 输入，通过单击两次按钮选择工况和 TABRND1 输入，如图 9-9 所示。

	SID	J	K	X	Y	TID
RANDPS	61	1	1	10.000	0.000	60
RANDPS	61	2	2	3.000	0.000	60
RANDPS	61	1	2	2.000	0.000	60

User Comments
Hide In Menu/Export
NUMBER_OF_RANDPS = 3
RANDT1

图 9-9　创建 RANDPS 卡片

（11）单击 return 两次返回 Analysis 页面。

STEP 03 增加 RANDOM 工况输入信息和输出要求

在频率分析模型中加入 RANDOM 工况相关信息并添加 RMS 和 PSD 结果输出请求。

（1）进入 Analysis 中的 Control Cards 面板。

（2）选择 GLOBAL_CASE_CONTROL。

（3）选中 RANDOM 复选框，双击 ID 按钮并选择 randps。

（4）返回到 Control Cards 并单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST，找到 STRESS。

（5）在 FORMAT 中选择 OUTPUT2，在 RANDOM 下面选择 PSDF，在 OPTION 下面选择 YES。应力 RMS 和 PSDF 在.op2 文件中输出。

（6）单击 return 返回 Control Cards 面板。

（7）选择 CASE_UNSUPPORTED_CARDS 并增加以下卡片：

XYPLOT,DISP,PSDF/ 19（T3）

RADIOSS 将输出节点 19 在 *Z* 轴方向上的平移位移 PSDF。

（8）单击 OK，单击 return。

STEP 04 提交任务

（1）从 Analysis 页面进入 RADIOSS 面板。

（2）单击 Save as 进入 input file。

（3）选择保存文件的目标文件夹，并在 File name 输入文件名 direct_psd.fem，单击 Save。

（4）将 run options 切换成 all，run options 切换成 Analysis，memory options 切换成 memory default，单击 Radioss。

如果任务顺利完成，可以在目标文件夹中看到写入的新的 RADIOSS 模型结果文件。同时，可以在文件中查看错误信息。该信息可以帮助调试提交任务输入中的任何错误。

写入目录的默认文件如下。

1）direct_psd.html：分析的 HTML 报告，问题描述和分析结果汇总。

2）direct_psd.out：RADIOSS 输出文件包含文件设置的详尽信息，优化问题设置，估计运行时所需内存和硬盘的空间，每一步优化迭代和计算时间的信息，为每一个警告和错误重新检查文件。

3）direct_psd.h3d：HyperView 压缩的二进制结果文件。

4）direct_psd.stat：分析过程的摘要，提供在整个分析过程中的每一步 CPU 信息。

对于随机响应分析还有以下特有的输出文件。

1）direct_psd.peak：ASCII 结果文件，包括 RMS 和 PSD 峰值。

2）direct_psd.rand：ASCII 结果文件，包含 PSD 结果。

3）direct_psd_rand.mvw：HyperView 脚本文件。该文件可以自动产生整个频率范围内的 PSD 平面图，包含在.rand 文件中。

4）direct_psd.op2：二进制文件，包括 RMS 和 PSD 结果。

STEP 05 查看 RMS 和 PSD 结果

这个步骤描述如何在 HyperView 中查看 RMS 和 PSD 的后处理结果。节点 19 位移的 PSD 在 direct_psd.rand 文件中输出，而频率 PSD 平面图可以在 direct_psd_rand.mvw 文件中

查看。RMS 和 PSD 应力结果在.op2 文件中。节点 19 位移的 RMS 和 PSD 峰值在.peak 输出文件中，可以用任何文本编辑器查看。

（1）打开 HyperView。

（2）加载 Direct_psd.op2 文件。

（3）单击，进入 Contour 面板。

（4）在屏幕左侧的 Load Case and Simulation Selection 窗口中选择 random 工况并在 Simulation 中选择 frequency = 20.0 Hz。

（5）选择结果类型 PSD STRESS（t），vonMises，并单击 Apply。

频率 20.0Hz 处 PSDvonMises 应力云图，如图 9-10 所示。

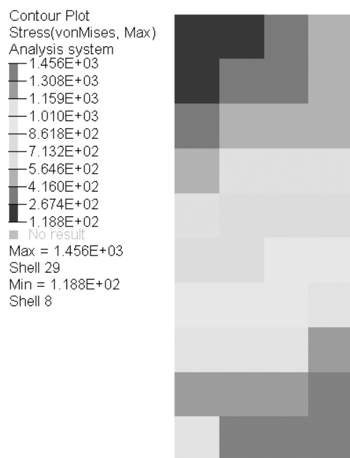


图 9-10　应力功率谱密度云图

（6）切换 Simulation 至 Simulation 1。

（7）选择结果类型 RMS stress 和 vonMises 并单击 Apply，RMS 应力云图将显示出来。

（8）在 Hyperview 窗口中，单击 File→Open→Session，打开 Open Session File 窗口。

（9）选择任务运行的目标文件夹并选择 direct_psd_rand.mvw 文件，单击 Open，如图 9-11 所示。

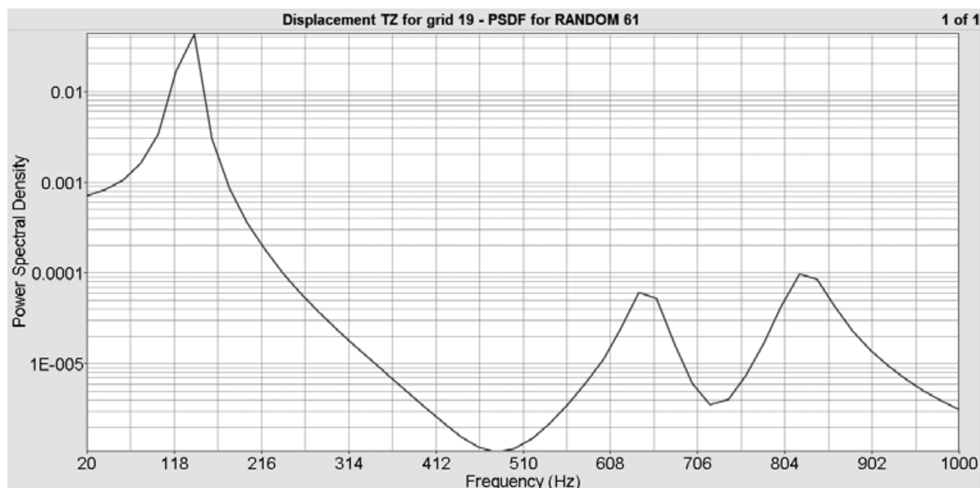


图 9-11　加速度功率谱输出曲线

9.3.3 随机响应分析实例（二）

本实例介绍如何在已有的模态法频率响应分析模型上进行随机响应分析。在.rand 文件中输出节点 217272 和 217274 位移的 PSD（功率谱密度），在.peak 文件中输出 PSD 的峰值和 RMS（均方根值）。PSD 和 RMS 应力结果在.op2 文件中输出，并在 HyperView 中进行后处理。

STEP 01 启动 HyperMesh，设置 RADIOSS（Bulk Data）用户模板，并打开文件 random_original.hm

这样就打开了 random_original.hm 模型，如图 9-12 所示。

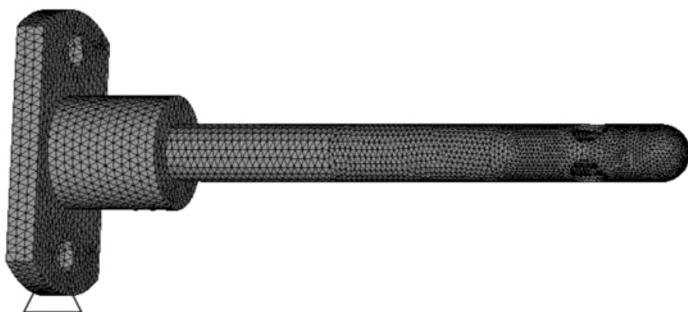


图 9-12　随机响应分析模型

这个模型的频率响应分析已经建立，模型的中一边夹紧而在另一边施加载荷（只有一种载荷一个工况）。加载频率用 FREQ1 卡片确定：频率从 15～1500Hz，增量是 10Hz。

STEP 02 建立载荷集 RANDPS 和 TABRND1

在这一步骤中，通过 RANDPS 卡片定义工况（自谱）PSDF。RANDPS 将引用 TABRNDi 类型的表格。

（1）单击 Load Collectors 按钮，选择 create 子菜单。

（2）单击 loadcol name =，输入 tabrnd1。

（3）单击 card image=，在弹出菜单中选择 TABRND1。

（4）单击 create/edit，进入 TABRND1 卡片编辑面板。

（5）输入参数，如图 9-13 和图 9-14 所示。

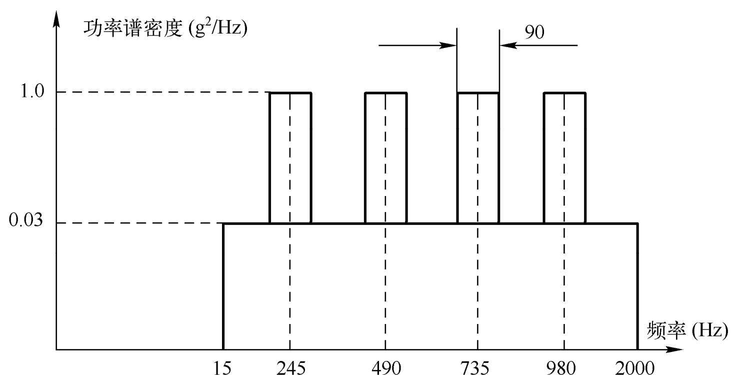


图 9-13　功率谱密度曲线

ID	XAXIS	YAXIS
TABRND1 1	LINEAR	LINEAR

f(1)	g(1)	f(2)	g(2)	f(3)	g(3)	f(4)	g(4)
15.000	0.300	199.000	0.300	200.000	1.000	290.000	1.000
f(5)	**g(5)**	**f(6)**	**g(6)**	**f(7)**	**g(7)**	**f(8)**	**g(8)**
291.000	0.300	444.000	0.300	445.000	1.000	535.000	1.000
f(9)	**g(9)**	**f(10)**	**g(10)**	**f(11)**	**g(11)**	**f(12)**	**g(12)**
536.000	0.300	689.000	0.300	690.000	1.000	780.000	1.000
f(13)	**g(13)**	**f(14)**	**g(14)**	**f(15)**	**g(15)**	**f(16)**	**g(16)**
781.000	0.300	934.000	0.300	935.000	1.000	1025.00	1.000
f(17)	**g(17)**	**f(18)**	**g(18)**				
1026.00	0.300	2000.00	0.300				

User Comments
Do Not Export
TABRND1_NUM = 18
reject
default
abort
return

图 9-14　功率谱密度曲线参数

（6）单击 return 返回到 create 面板。

（7）在 loadcol name =文本框中输入 randps。

（8）单击 card image =，并选择 RANDPS。

（9）单击 create/edit 并进入 RANDPS 卡片编辑面板。

（10）定义 RANDPS 输入。通过双击 J（1）、K（1）和 TID（1）按钮选择工况和 TABRND1 输入。需要输入的值，如图 9-15 所示。

	SID	J(1)	K(1)	X(1)	Y(1)	TID(1)
RANDPS	8	1	1	10.000	0.000	7

图 9-15　RANDPS 卡片设置

（11）单击 return 两次返回 Analysis 面板。

STEP 03 增加 RANDOM 工况输入信息和输出要求

在频率分析模型中加入 RANDOM 工况相关信息并添加 RMS 和 PSD 结果输出请求。

（1）进入 Analysis 中的 Control Cards 面板。

（2）选择 GLOBAL_CASE_CONTROL。

（3）选中 RANDOM 复选框，双击 ID 按钮并选择 randps。

（4）返回到 Control Cards 并单击 GLOBAL_OUTPUT_REQUEST，找到 STRESS。

（5）在 FORMAT 中选择 OUTPUT2，在 RANDOM 下边选择 PSDF，在 OPTION 下边选择 YES。应力 RMS 和 PSDF 在.op2 文件中输出。

（6）单击 return 返回 Control Cards 面板。

（7）选择 CASE_UNSUPPORTED_CARDS 并增加以下卡片：

XYPLOT,DISP,PSDF/ 217272（T3）

XYPLOT,DISP,PSDF/ 217274（T3）

RADIOSS 将输出节点 217272 和 217274 在 *Z* 轴方向上的平移位移 PSDF。

（8）单击 OK，单击 return。

STEP 04 提交任务

（1）从 Analysis 页面进入 Radioss 面板。

（2）单击 Save as 进入 input file。

（3）选择保存文件的目标文件夹并在 File name 中输入 random.fem 文件名，单击 Save。

（4）将 export options 切换到 all，run options 切换到 analysis，memory options 切换到 memory default，单击 Radioss。

如果任务顺利完成，可以在目标文件夹中看到写入的新的 RADIOSS 模型结果文件。同时，可以在文件中查看错误信息。该信息可以帮助调试提交任务输入中的任何错误。

写入目录的默认文件有如下。

1）random.html：分析的 HTML 报告，问题描述和分析结果汇总。

2）random.out：RADIOSS 输出文件包含文件设置的详尽信息，优化问题设置，估计运行时所需内存和硬盘的空间，每一步优化迭代和计算时间的信息，为某一个警告或错误重新检查文件。

3）random.h3d：HyperView 压缩的二进制结果文件。

4）random.stat：分析过程的摘要，提供在整个分析过程中的每一步 CPU 信息。

对于随机响应分析还有以下特有的输出文件。

1）random.peak：ASCII 结果文件，包括 RMS 和 PSD 峰值。

2）random.rand：ASCII 结果文件，包含 PSD 结果。

3）random_rand.mvw：HyperView 脚本文件。该文件可以自动产生整个频率范围内的 PSD 平面图，包含在.rand 文件中。

4）random.op2：二进制文件，包括 RMS 和 PSD 结果。

STEP 05 查看 RMS 和 PSD 结果

这个步骤描述如何在 HyperView 中查看 RMS 和 PSD 的结果。节点 217272 和 217274 位移的 PSD 在 direct_psd.rand 文件中输出，而频率 PSD 平面图可以在 direct_psd_rand.mvw 文件中查看。RMS 和 PSD 应力结果在.op2 文件中。节点 217272 和 217274 位移的 RMS 和 PSD 峰值在.peak 输出文件中，可以用任何文本编辑器查看。

（1）打开 HyperView。

（2）加载 random.op2 文件。

（3）单击，进入 Contour 面板。

（4）在屏幕左侧的 Load Case and Simulation Selection 窗口中选择 SUBCASE 8 工况，并在 Simulation 中选择 frequency = 915 Hz。

（5）选择结果类型 PSD STRESS（t）和 vonMises，并单击 Apply。

频率 915Hz 处 PSDvonMises 应力云图如图 9-16 所示。

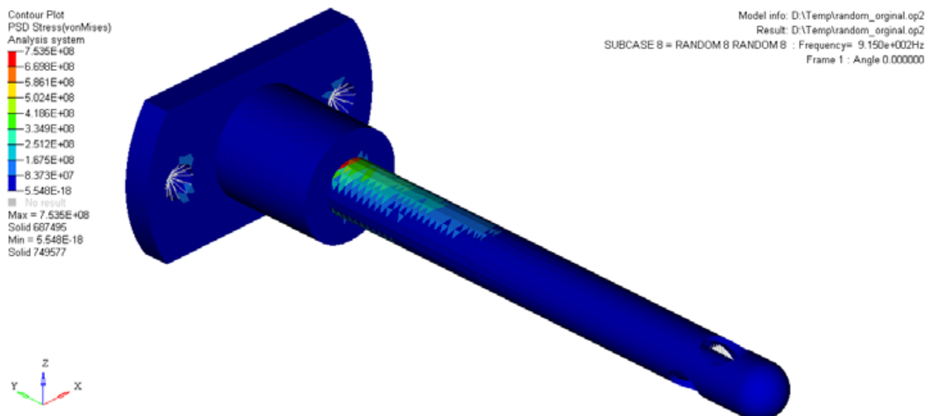


图 9-16　PSD 应力云图

（6）切换 Simulation 至 Simulation 1。

（7）选择结果类型 RMS stress 和 vonMises 并单击 Apply，RMS 应力云图将显示出来。

（8）在 Hyperview 窗口中，单击 File→Open→Session，打开 Open Session File 窗口。

（9）选择任务运行的目标文件夹并选择 random_rand.mvw 文件，单击 Open，如图 9-17 所示。

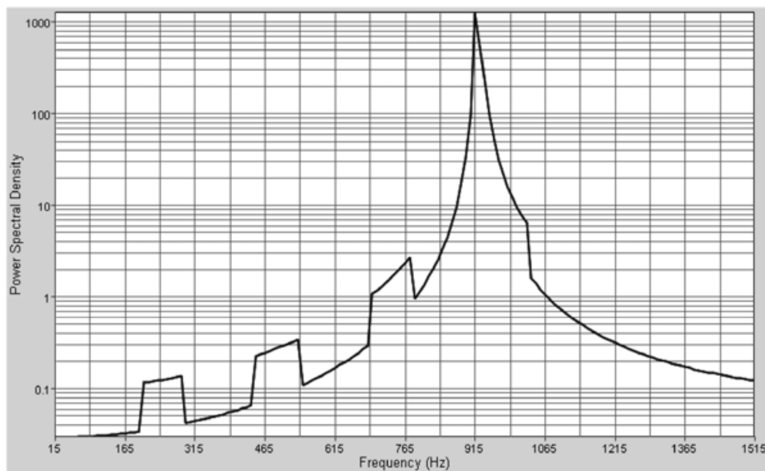


图 9-17　PSD 位移功率谱输出曲线

9.4　本章小结

本章介绍了响应谱分析和随机响应分析的基本理论和软件操作实例。响应谱分析是瞬态响应分析的简化，选用响应谱分析还是瞬态响应分析取决于具体情况。瞬态响应分析可以得到更精确的结果，如果载荷时间历程很复杂或者结构本身很大则使用响应谱分析是比较可行的方法。

随机响应分析可以认为是频率响应分析的简化。随机响应分析通过输入的功率谱密度得到输出的功率谱密度和均方根值。如果希望得到和频率相关的加速度峰值等精确结果，则需要使用频率响应分析。

第 10 章

热-热力耦合分析



HyperWorks 中有两个模块可以进行热分析。本章介绍的 RADIOSS Bulk Data 主要针对结构稳态热分析，包括热应力分析、稳态热传导分析和热力耦合分析。HyperWorks 中的另一个模块 AcuSolve 可以进行稳态热分析、瞬态热分析、流固耦合热分析以及热辐射分析等。

本章重点知识

10.1　热-热力耦合分析基本理论

10.2　分析实例

10.3　本章小结

10.1 热–热力耦合分析基本理论

10.1.1 稳态热传导分析

传热分析主要求解热载荷作用下结构未知的温度和热流量。温度表征了可用热量的多少，热流量表征了热量流动的快慢。热传递的热量交换是通过分子运动实现的，固体与其周围的流体之间的热量交换是通过自然对流实现的。热载荷以流入和流出系统的热流量大小的方式定义。

在线性稳态分析中，材料的属性（如传热系数和对流系数等）都是线性的，而且主要关心结构在热平衡稳态时的温度和热流量。基本的有限元分析方程式为式（10−1）：

$$((K_c)+(H))\{T\}=\{P\} \quad (10-1)$$

式中，(K_c) 是传热系数矩阵，(H) 是自然对流的边界换热系数矩阵，$\{T\}$ 是未知的节点温度，$\{P\}$ 是热载荷向量。求解系统的线性方程可以得到节点温度 $\{T\}$。

热载荷向量可以表示成式（10−2）：

$$\{p\}=\{p_B\}+\{p_H\}+\{p_Q\} \quad (10-2)$$

式中，$\{p_B\}$ 是边界热通量功率，可以在 QBDY1 卡片中定义；$\{p_H\}$ 是自然对流的对流向量，在 CONV 卡片中定义；$\{p_Q\}$ 是内部生热的功率向量，在 QVOL 卡片中定义。

在没有定义温度边界条件的情况下，方程式（10−1）左边的矩阵是奇异的。利用高斯消元法求解平衡方程得到未知温度。高斯消元法利用矩阵的对称性和稀疏性提高了计算效率。计算出节点处的温度之后，就可以根据单元的形函数计算出温度梯度 $\{VT\}$。单元的热流量可以用式（10−3）计算：

$$\{f\}=[k]\{VT\} \quad (10-3)$$

式中，(k) 是材料的传热矩阵。

关于传热分析和结构分析的对比如表 10−1 所示。

表 10−1　传热分析和结构分析的对比表

	传 热 分 析	结 构 分 析
未知量	温度	位移
	温度梯度	应变
	热流量	应力
(K_c)	传热系数矩阵	刚度矩阵
(H)	边界对流系数矩阵	弹性基础刚度矩阵
$\{P\}$	热流量向量	载荷向量

热载荷和边界条件在输入文件的 Bulk Data 部分定义。它们需要分别以 SPC 或 MPC 的形式和 LOAD 的形式被 SUBCASE 引用。

10.1.2 热力耦合分析和优化

每个传热工况都定义了一个温度集，该温度集可以通过被结构工况的 TEMP（LOAD）选项引用实现与结构工况的耦合，以执行热力耦合分析。在默认情况下，温度集 ID 号和换热工况 ID 号相同，这可以在 TSTRU 卡片中修改。如果温度集 ID 号与 Bulk Data 的温度集 ID 号相同，换热分析的温度就会覆盖 Bulk Data 的温度。

热力耦合分析按照如下的方式执行。首先执行传热分析以确定结构的温度场。温度场作为结构分析时施加的载荷的一部分。热分析和结构分析使用相同的单元。静态结构分析的有限元控制方程见式（10−4）：

$$(K)\{D\}=\{f\}+\{f_T\} \tag{10-4}$$

式中，(K)是整体刚度矩阵；$\{D\}$是待求解的位移向量；$\{f_T\}$是温度载荷；$\{f\}$是结构载荷，如力、压力等；位移向量$\{D\}$可以通过线性方程求解器求解线性方程得到。

在热结构耦合优化中，需要计算$\{f_T\}$对结构设计变化的灵敏度。除了常见的响应，如位移、应力、质量等，温度也可以作为优化的一种响应，但是该响应不适用于拓扑优化和自由尺寸优化。

热结构分析中的耦合是顺序进行的，热分析会影响随后的结构分析，但是结构分析对热分析没有任何影响。在热结构耦合优化中，优化者为了满足结构响应的约束而改变结构，这也会影响热分析的结果。

10.2 分析实例

10.2.1 热应力分析实例

STEP 01 载入 RADIOSS（Bulk Data）用户模板，并打开模型文件 coffee_lid.hm

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 User Profiles 对话框。如果没有弹出，可以从工具栏中的 Preferences 下拉菜单进入。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK 按钮。

（4）在 File 下拉菜单中单击 open，弹出 open model 窗口。

（5）在光盘中找到 coffee_lid.hm 文件并打开。

STEP 02 创建材料

（1）单击 Materials 工具按钮，进入 Create 子面板。

（2）单击 mat name = 并输入 plastic。

（3）单击 type = 并选择 ISOTROPIC。

（4）单击 card image =，选择 MAT1。单击 card/edit，在卡片中为材料输入下列参数：弹性模量 E = 1137，泊松比 μ = 0.26，热膨胀系数 $A = 81\times10^{-6}$/℃。

（5）单击 Return 按钮两次，返回主界面。

STEP 03 创建属性

（1）单击 Card Editor 工具按钮。

（2）将对象类型改为 props。

（3）单击 props 然后选中 PSHELL 复选框。单击 select。

（4）单击 edit，确认厚度值 T 是 2.5。注意到，MID 项全都是 0，说明没有引用材料。

（5）单击 return 保存修改。

（6）单击 Properties 按钮，在左侧选择 update 子面板。

（7）单击黄色的 props。

（8）选中 PSHELL 和 PSHELL1 复选框并单击 select。

（9）单击 material 并选择 plastic。

（10）单击 update 更新，现在两个属性都具有了编号为 1 的材料属性。

（11）单击 return 返回主面板。

STEP 04 创建载荷集

（1）在 Model Browser 用鼠标右键单击 Create LoadCollector。

（2）在 Name 处输入 constraints。

（3）将 Card image 设置为 None。

（4）选择一个颜色 color。

（5）单击 Create 创建载荷集并自动置为当前载荷集。

STEP 05 在下图位置创建约束

（1）单击 BCs→Create→Constraints，打开 Constraints 面板。

（2）单击 entity selection 切换到 nodes。

（3）选择图 10–1 中的两个节点。

（4）只约束 dof3。单击 create 创建约束。

（5）在 size = 后面输入 1.0，该项指定载荷图标的显示大小。

（6）单击 return 返回主面板。

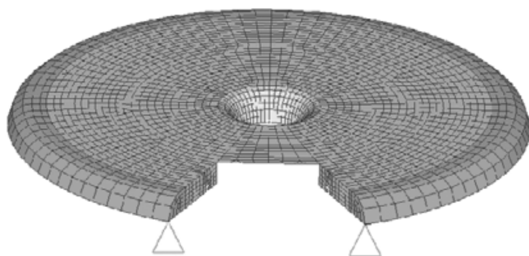


图 10-1　选择用于创建约束的两个点

STEP 06 创建对面位置的两个约束（模拟铰链）

（1）单击 Geometry→Create→Nodes→XYZ，打开 Notes：XYZ 面板。
（2）在 x = 文本框中输入 0.0。
（3）在 y = 文本框中输入–10.0。
（4）在 z = 文本框中输入 0.0。
（5）单击 create 创建对称轴部位的一个临时节点（0, −10, 0）。
（6）单击 return 返回主面板。
（7）单击 BCs→Create→Constraints，打开 Constraints 面板。
（8）选择图 10-2 中的节点。

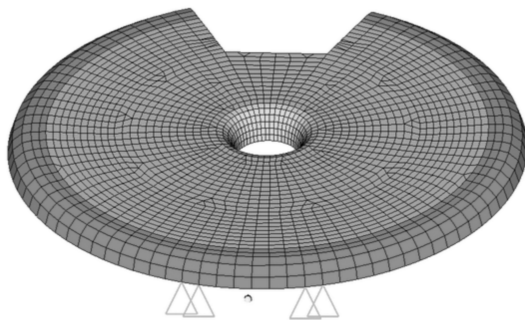


图 10-2　创建约束的节点

（9）约束 dof1、dof2 和 dof3。单击 create 创建约束。
（10）单击 return 返回主面板。
（11）进入 Geom 中的 temp nodes 面板。
（12）单击 clear all 清除临时节点，然后单击 return 返回主面板

STEP 07 创建工况

（1）单击 Setup→Create→LoadSteps，打开 LoadSteps 面板
（2）在 name = 处输入 brew cycle。

（3）单击 type，选择 linear static。

（4）选中 SPC 复选框。在 SPC 的右边会出现一个输入区域。

（5）单击 = 从载荷集列表中选择 constraints 。

（6）选中 TEMP 复选框。在 TEMP 的右边会出现一个输入区域。

（7）单击 = 从载荷集列表中选择 THERMAL_LOADING。

（8）单击 create 创建工况。该工况引用了 constraints 中的约束和 THERMAL_LOADING 中的载荷。

（9）单击 return 返回主面板。

STEP 08 运行分析

（1）进入 Analysis 中的 RADIOSS 面板

（2）单击 save as 选择一个目录并保存为 lid_complete.fem。

（3）单击 Save 保存求解文件

（4）设置 export options 为 all，run options 为 analysis，memory options 为 memory default。单击 Radioss 按钮提交求解。

RADIOSS 线性静态分析默认会输出位移和应力。下面介绍 HyperView 中查看结果的操作。

STEP 09 查看变形形状

（1）单击 RADIOSS 面板中的 HyperView 按钮。这样就启动了 HyperView 并载入 lid_complete.h3d 文件读取模型和结果。

（2）单击工具栏上的 Wireframe Elements 按钮。

（3）将 Animation Mode 设置为 Linear。

（4）单击工具栏上的 Deformed 按钮。

（5）将 Result type 设置为 Displacement（v）。

（6）将 Scale 设置为 Model units value 并输入 2。这表示最大变形为两个模型单位，其他位移相应地成比例缩放。

（7）将 Undeformed Shape 选项设置为 Wireframe，且 Color 项选择为 Component。

（8）单击 Apply。

从图 10–3 中可以看到变形前后的形状叠加显示在一起，同时可以通过结果查看约束是否正确施加。

STEP 10 查看位移及应力的等值图

（1）选择 Contour 面板中的按钮。

（2）Result type 选择 Displacement（v）。

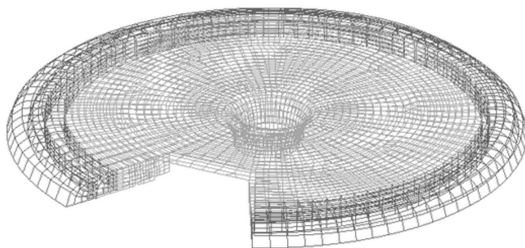


图 10-3　变形前后的形状叠加显示

（3）data type 选择 Mag（位移的幅值）

（4）单击 Apply 查看位移云图

（5）Result type 选择 Element Stresses（2D & 3D）。

（6）data type 选择 vonMises。

（7）单击 Apply 查看应力云图

注意到图 10-4 中铰链位置的应力较大。该热应力可能会造成疲劳失效。

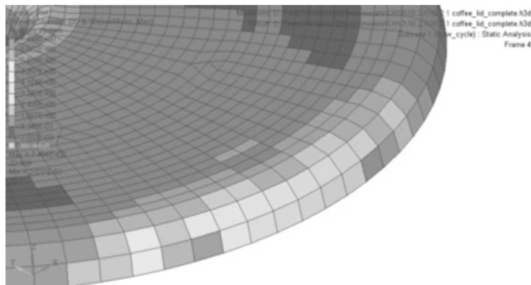
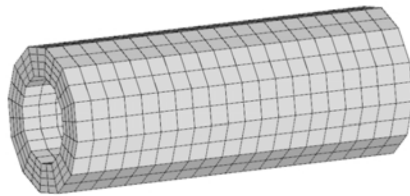


图 10-4　应力云图

10.2.2 稳态热传导分析实例

本例将对钢管进行热传导分析。如图 10-5 所示，钢管内表面的温度为 60℃，外表面暴露于空气中，其温度为 20℃。通过进行线性稳态热传导以及对流分析，确定钢管的温度分布。



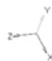


图 10-5　分析模型

STEP 01 载入 RADIOSS（Bulk Data）用户模板并导入模型

（1）启动 HyperMesh。

（2）在 User Profile 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 BulkData。

（4）单击 OK。这样就可以载入用户模板。其中包括合适的模板、宏菜单、数据读入接

口，根据生成 RADIOSS 中 Bulk Data 格式模型的要求来调整 HyperMesh 的功能。

也可以通过工具栏上的 Preferences 下拉菜单进入 User Profiles 对话框。

（5）单击 Import 面板工具栏按钮，进入 Import 视窗。Import type 选择 FE Model，File type 选择 RADIOSS（Bulk Data）。

（6）在 File 的右边区域单击按钮，打开 Select RADIOSS（Bulk Data）file 对话框。

（7）在 HyperWorks 的安装路径<install_directory>/tutorials/hwsolvers/RADIOSS/下找到文件 thermal.fem。

（8）单击 Open，文件 thermal.fem 的路径则显示在 File 右边区域中。

（9）单击 Import。文件 thermal.fem 被导入到当前的 HyperMesh 中。

STEP 02 创建热力学材料属性

在创建组件集（component collectors）之前创建材料集（material collectors）和属性集（property collectors）。

（1）单击 Materials 按钮。

（2）进入 create 子面板。

（3）单击 mat name = 并输入 steel。

（4）单击 type = 并选择 ISOTROPIC。

（5）单击 card image = 并选择 MAT1。

（6）单击 create/edit 进入材料卡片编辑面板。

（7）在 User Comments 选项区选中 MAT4 复选框。

在材料信息区域，MAT4 出现在 MAT1 下面。MAT1 卡片用于定义各向同性材料。MAT4 卡片用于定义材料的热力学常量参数。MAT4 与 MAT1 的 ID 号一致。

如果材料属性中某一项没有值，表示该项没有激活。单击想改变的选项将其激活，下面会出现输入栏。单击输入栏并填入数据。

（8）对于材料 steel，在卡片中输入以下材料信息。

弹性模量：$E = 2.1 \times 10^{11}$Pa。

泊松比：$\mu = 0.3$。

材料密度：$\rho = 7.9 \times 103$ kg/m^3。

热膨胀系数：$A = 1.0 \times 10^{-5}$/℃。

导热率：K = 73W/m·℃。

传热系数：H = 40W/m^2·℃。

（9）单击 return 两次回到主菜单。新建材料 steel 被赋予结构属性及热属性。

（10）单击 Properties 按钮。

（11）单击 prop name = 并输入 solid。

（12）单击 type = 并选择 3D。

（13）单击 card image = 并选择 PSOLID。

（14）单击 material = 并选择 steel。

（15）单击 create。

（16）单击 return 回到主菜单。

钢管的属性被定义为 3D PSOLID，其材料信息也同时被赋予。

STEP 03 将材料及属性赋给结构

一旦定义好材料及属性，就可以将其赋给结构。

（1）单击 Components 按钮。

（2）选中 update 单选按钮，进入 update 子面板。

（3）单击突出显示的 comps 并选择组件 pipe。

（4）将<no property>改为 property =。

（5）单击 property = 并从弹出的菜单中选择 solid。属性卡片及材料信息将显示在属性文本框的下方。

（6）单击 update。

（7）单击 return 回到主菜单。

在模型中施加热边界条件。

该练习中施加的热边界条件保存于预先定义的载荷集 spc_temp 中。预先定义的节点 4679 用于指定环境温度。预先定义的节点集 node_temp 中包括了位于钢管内表面的节点。

STEP 04 在钢管的内表面施加温度载荷

（1）单击 HyperMesh 图形区右下角的 Set Current Load Collector 面板，将会出现一个载荷集列表。

（2）确认 spc_temp 为当前载荷集。

（3）进入 Analysis 页面，选择 constraints 面板。

（4）进入 create 子面板。

（5）单击对象选择开关，并选择 nodes。

（6）单击 nodes 并从弹出的菜单中选择 by sets。

（7）选择 node_temp 并单击 select。

（8）不选中 dof1、dof2、dof3、dof4、dof5 和 dof6 并保持各个自由度后面文本框中的数值为 0.0。

（9）单击 load types，并选择 SPC。

（10）单击 create。这样就在钢管内表面的节点上施加 0℃温度载荷。下一步中，将温度改为 60℃。

（11）单击 Card edit 按钮。

（12）选择 loads。

（13）单击 loads 并选择 by collectors。

（14）选中 spc_temp 复选框并单击 select。

（15）单击 config = 并选择 const。

（16）单击 type = 并选择 SPC。

（17）单击 edit。

（18）单击 D 并输入 60.0。

（19）单击 return 两次回到 Analysis 页面。

STEP 05 设置环境温度

（1）确认 spc_temp 为当前载荷集。

（2）在 Analysis 页面中选择 constraints 面板。

（3）进入 create 子面板。

（4）单击 nodes 并从弹出的菜单中选择 ID。

（5）输入预先定义的节点 ID4679。节点 4679 应该被突出显示。

（6）不选中 dof1、dof2、dof3、dof4、dof5 和 dof6 复选框，并保持各个自由度后面文本框中的值为 0.0。

（7）单击 create。

（8）单击 Card edit 按钮。

（9）选择 loads。

（10）选择屏幕中刚刚创建的环境 spc。

（11）单击 config = 并选择 const。

（12）单击 type = 并选择 SPC。

（13）单击 edit。

（14）单击 D，并输入 20.0。

热边界条件已经创建，如图 10−6 所示。

（15）单击 return 两次回到 Analysis 页面。

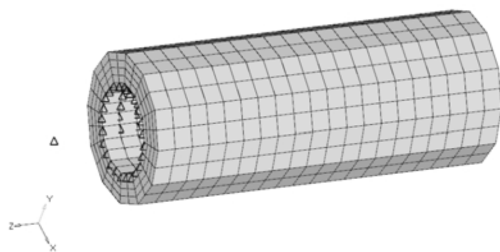


图 10−6　热边界条件

STEP 06 为热对流创建 CHBDYE 表面单元

表面单元用于模拟实体管与周围空气的热交换。预先定义的单元集 elem_convec 中包括了位于钢管外表面的实体单元，此单元集用以定义表面单元。

（1）在 Analysis 页面中单击 interfaces。

（2）在 create 子面板中单击 name = 并输入 convection。

（3）单击 type = 并选择 CONVECTION。

（4）单击 interface color，并从调色板选择一种颜色。

（5）单击 create/edit 进入 PCONV 卡片编辑面板。

（6）单击 MID 并选择 steel 作为材料，单击 return。

这样就创建了自由对流属性 PCONV 以及单元集合 convection。

（7）进入 add 子面板。

（8）单击 name = 并选择 convection。

（9）单击 slave 并从弹出的菜单中选择 face。

（10）单击突出显示的 solid elems 并从弹出的菜单中选择 by sets。

（11）选择单元集 elem_convec 并单击 select。

（12）在 face nodes 区域单击 nodes。

（13）选择一个实体单元表面的 4 个节点，如图 10−7 所示。

（14）单击 break angle = 并输入 89.0。

（15）单击 add。

这样就在所有选中实体单元的同一侧创建了 CHBDYE 表面单元，如图 10−8 所示。

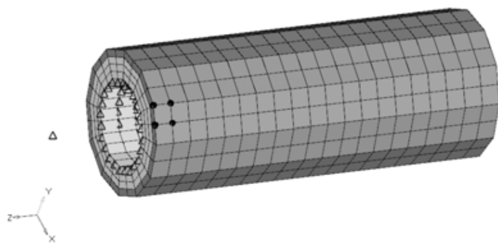


图 10−7　选择钢管外侧实体单元表面节点

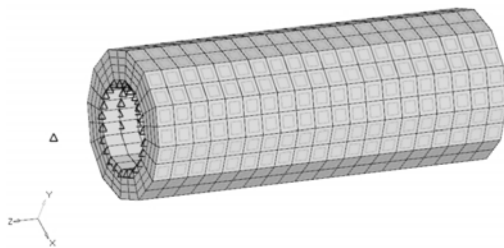


图 10−8　位于钢管外侧的表面单元

STEP 07 在表面单元上创建对流边界条件

（1）单击 Card edit 按钮。

（2）选择 elems。

（3）单击 elems 并选择 by group。

（4）选中 convection 复选框，并单击 select。

（5）单击 config = 并选择 slave4。

（6）单击 type = 并选择 CHBDYE4。

（7）单击 edit 进入 CHBDYE 卡片面板。

（8）选中 CONV 复选框。

（9）如图 10−9 所示，单击 TA1 并输入节点 ID 号 4679。

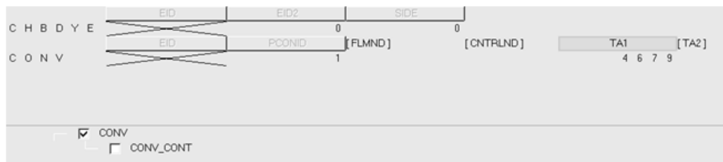


图 10−9　指定环境温度参考点

（10）单击 return 两次回到 Analysis 页面。

STEP 08 创建热传导工况

这一步将会创建一个 RADIOSS 稳态热传导工况。该工况与载荷集 spc_temp 中的热边界

条件相关联。传热分析中梯度、流量、温度的输出通过 T loadsteps 面板来定义。

（1）在 Analysis 页面中选择 loadsteps 面板。

（2）单击 type 开关，选择 heat transfer。

（3）单击 name = 并输入 heat_transfer。

（4）选中 SPC 复选框。

（5）单击“=”，并选择 spc_temp。

（6）单击 create。

（7）单击 edit 进入 subcase 编辑面板。

（8）选中 Analysis 复选框，在工况的信息区域出现 analysis type 选项。

（9）单击 TYPE 下面的按钮，并选择 HEAT 作为分析类型。

（10）选中 Output 复选框。

（11）选中 Output 下面的 FLUX 以及 THERMAL 两个复选框。这两个复选框出现在工况信息区域。

（12）分别单击两个 FORMAT 按钮并选择输出的结果文件格式为 H3D。

（13）分别单击两个 OPTION 按钮并选择 ALL。FLUX 和 THERMAL 的输出也可以在 Analysis 页面的 control cards 面板中进行定义。

（14）单击 return 两次。

STEP 09 启动 RADIOSS

（1）在 Analysis 页面中选择 RADIOSS 面板。

（2）单击 input file 右边的 save as，出现 Save As 对话框。

（3）选择 RADIOSS 模型文件的保存路径，并在 File name 的右面区域输入模型的名称 thermal_complete.fem。.fem 文件是推荐的 Bulk Data 输入数据格式。

（4）单击 Save，thermal_complete.fem 的文件名及其路径显示在 input file 右边的区域中。

（5）设置 memory options 为 memory default。

（6）单击 run options 并选择 analysis。

（7）设置 export options 为 all。

（8）单击 Radioss。

这样就可以启动分析作业。如果分析成功完成，就可以在所选择的 thermal_complete.fem 文件的存储路径中得到结果文件。thermal_complete.out 文件可用于查找错误信息，如果分析过程报错可以借助此文件进行模型调试。

通过 RADIOSS 可以计算得到稳态热传递分析的温度梯度以及热流量等结果，也可以计算得到结构的应力及位移结果。HyperView 用于对计算结果机型后处理。

STEP 10 查看热传递分析的结果

（1）一旦在命令窗口得到 Process completed successfully 的信息，就可以单击 Hyper View。这样就可以启动 HyperView 并加载结果文件。模型和结果文件加载成功时会出现信息

提示窗口。

（2）单击 Close 关闭信息提示窗口。

（3）单击 Contour 工具按钮。

（4）单击 Result type 下面的第一个下拉菜单并选择 Grid Temperatures（s）。

（5）单击 Apply。这样就创建了节点温度结果云图。

（6）单击 Result type 下面的第一个下拉菜单并选择 Element Fluxes（V）。

（7）单击 Apply。

热流量以及温度结果云图都显示在图 10–10 中。

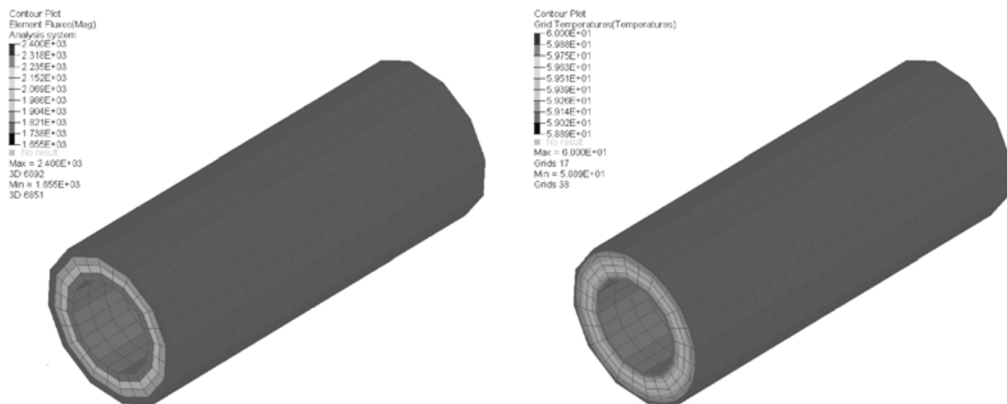


图 10–10　热传递分析结果

10.2.3　热–结构耦合分析实例

本例将对一根钢管进行线性热力耦合分析。如图 10–11 所示，钢管一端固定在地面上，从钢管的另一端施加热流载荷。首先定义一个稳态的线性传热分析。然后通过在结构求解工况下引用 TEMP 执行热力耦合求解。该分析问题在 HyperMesh 中定义，然后用 RADIOSS 进行求解，利用 HyperView 进行结果的后处理。

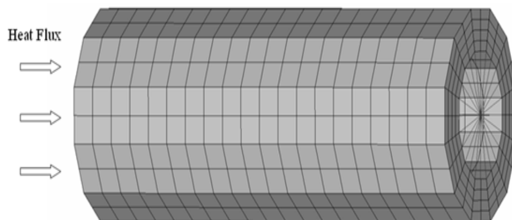


图 10–11　要进行计算的的模型

STEP 01　载入 RADIOSS（Bulk Data）用户模板，并导入模型文件 pipe.fem

STEP 02　创建热力耦合结构的材料属性

在创建部件集之前先创建材料和属性的集。

（1）单击 Materials 工具按钮。进入 Create 子面板。

（2）单击 mat name = 并输入 steel。

（3）单击 type = 并选择 ISOTROPIC。

（4）单击 card image = 并选择 MAT1。

（5）单击 create/edit 进入材料属性编辑面板。

（6）在 User Comments 选项区选中 MAT4 复选框。

在材料信息区域，MAT4 卡片出现在 MAT1 卡片的下面。MAT1 卡片用于定义各向同性结构的材料，MAT4 卡片用于定义稳态热分析材料，这两种卡片采用相同的 ID 号。

如果在方括号的下面没有数字，那么材料将不具有方括号中名称的参数属性。为了赋给材料该参数，可以单击方括号，然后在方括号的下面会出现一个文本框，单击文本框，输入一个数值，就可以将该参数赋给材料。

（7）在卡片中为材料输入下列参数：

弹性模量 $E = 2.1\times10^{11}$；泊松比 $\mu = 0.3$；密度（RHO）$\rho = 7.9\times10^{3}$ kg/m^3；热膨胀系数 $A = 1\times10^{-5}$/℃；热导率 $K = 73$W/(m•℃)，输入后的结果如图 10−12 所示。

图 10−12　定义材料

（8）单击 Return 按钮两次，返回主界面，这样就创建了一种传热的结构材料。

（9）单击 Properties 工具按钮。

（10）单击 prop name = 并输入 solid。单击 type = 并选择 3D。

（11）单击 card image = 并选择 PSOLID。

（12）单击 material = 并选择 steel。单击 create 按钮。

（13）单击 Return 按钮，返回主界面。

这样就为实体钢管创建了 3D PSOLID 属性，并将材料信息与此属性关联了起来。

STEP 03 将已经定义的材料信息和属性赋给结构模型

（1）单击 Components 工具按钮，进入 update 子面板。

（2）单击 comps 按钮，在弹出的集列表中选择 pipe。

（3）单击<no property>前面的选择开关，将<no property>选项切换为 property =。

（4）单击 property =，从弹出的属性集列表中选择 solid。在属性输入区的下面将显示属性卡片和材料信息。

（5）单击 update，单击 return，返回主界面。

在 RBE2 单元上施加约束将管道的一端固定在地面上。该约束存放在载荷集 spc_struct 中。spc_heat 和 heat_flux 两个空载荷集已经预先创建，这一步将在模型上施加热边界条件和热流载荷，并分别保存在 spc_heat 和 heat_flux 载荷集中。

STEP 04 创建热边界条件

（1）单击 HyperMesh 图形区右下角的 Set Current Load Collector 面板，将会出现一个载荷集列表。

（2）选择 spc_heat 为当前载荷集。

（3）进入 Analysis 中的 constraints 面板。

（4）进入 create 子面板。

（5）单击对象选择开关，从弹出的菜单中选择 nodes。

（6）单击 nodes 并从弹出的菜单中选择 selectbyset。

（7）选择之前已经创建的节点集 heat。此时管道固定端被选中的节点会高亮显示。

（8）不选中 dof1、dof2、dof3、dof4、dof5 和 dof6，并保持各自由度后面的文本框中的数值为 0.0。

（9）单击 load types =，从弹出的菜单中选择 SPC。单击 create。这样就为所选择的节点创建了热边界约束。

（10）单击 return 返回 Analysis 页面。

STEP 05 创建 CHBDYE 表面单元

由于热流量载荷是施加在管道的自由端的表面上的，所以为了定义换热边界条件必须先定义 CHBDYE 表面单元。

（1）单击 Analysis 页面中的 interfaces。

（2）在 Create 子面板中单击 name = 并输入 heat_surf。

（3）单击 type = 并选择 CONDUCTION。

（4）单击 interface color 并从弹出的调色板中选择一种颜色。

（5）单击 create。

（6）进入 add 子面板。

（7）单击 name = 并选择 heat_surf。

（8）单击 slave 下面的开关按钮并从弹出的菜单中选择 face。

（9）单击 solid elems 并从弹出的菜单中选择 by sets。

（10）选择 solid_elems 单元集并单击 select。

（11）在 face nodes 区域单击 nodes。

（12）选择将会施加热流量载荷的实体单元的 4 个节点，如图 10−13 所示。

（13）单击 add。

这样就在所有选中实体单元的同一侧创建了 CHBDYE 表面单元，如图 10−14 所示。

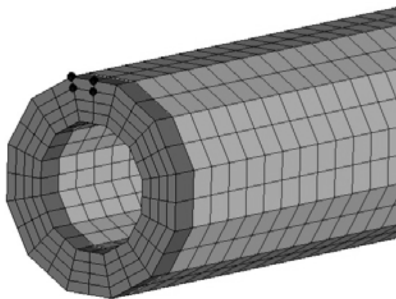


图 10–13　选择面单元上的节点

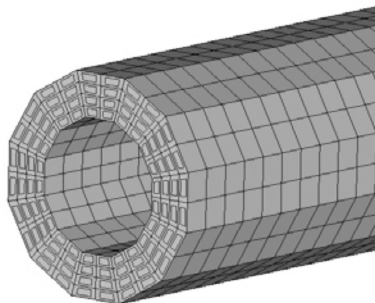


图 10–14　CHBDYE 面单元

STEP 06 在表面单元上创建热流载荷

（1）在 Set Current Load Collector 面板中定义当前的载荷集为 heat_flux。
（2）进入 Analysis 中的 flux 面板，进入 create 子面板。
（3）单击 elems 并在弹出的菜单中选择 bygroup。
（4）选择 heat_surf 并单击 select。此时之前创建的面单元会高亮显示。
（5）单击 load types = 并选择 QBDY1。在 value = 文本框中输入 1.0。
（6）单击 create。这样就在面单元上定义了均匀分布的热流量载荷。
（7）单击 return 返回 Analysis 页面。

STEP 07 创建一个传热工况

这一步将会创建一个 RADIOSS 的稳态热传导的工况。该工况与载荷集 spc_heat 中的热边界条件和 heat_flux 中的热流量载荷相关联。传热分析输出的梯度、流量和温度也会在 loadsteps 面板中进行定义。

（1）进入 Analysis 中的 loadsteps 面板。
（2）单击 name = 并输入 heat_transfer。
（3）单击 type 开关，选择 heat transfer。
（4）选中 SPC 复选框，在 SPC 的右边会出现一个文本框。
（5）单击“=”，在弹出的载荷集列表中选择 spc_heat。
（6）选中 LOAD 复选框，在 LOAD 的右边会出现一个文本框。
（7）单击“=”，在弹出的载荷集列表中选择 heat_flux。
（8）单击 create。
（9）单击 edit 进入工况的编辑面板，为即将进行计算的工况定义 ID 号。
（10）选中 Analysis 复选框，工况的信息区域出现 analysis type 选项。
（11）单击 TYPE 下面的按钮并选择 HEAT 为分析类型。
（12）选中 Output 复选框。
（13）选中 Output 下的 FLUX 和 THERMAL 两个复选框。这两个输出选项出现在工况

信息区域。

（14）分别单击两个 FORMAT 按钮并选择输出的结果文件格式为 H3D。

（15）分别单击两个 OPTION 下面的按钮，选择 ALL，如图 10–15 所示。FLUX 和 THERMAL 的输出也可以在 Analysis 页面的 control cards 面板中进行定义。

（16）单击 return 返回。

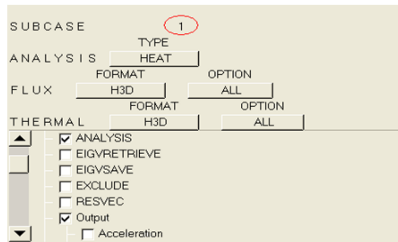


图 10–15　工况编辑面板

STEP 08 创建结构分析载荷工况

为了进行热–结构耦合分析，必须将传热工况与结构工况关联起来，如图 10–16 所示。或者在模型导出后编辑.fem 结果文件来创建线性静力结构分析的工况。

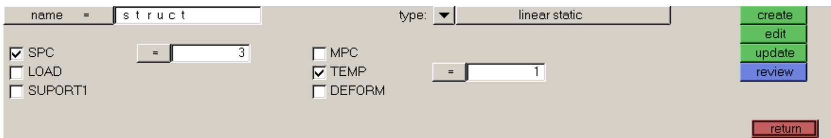


图 10–16　耦合工况定义

Fem 文件中的工况定义：

```
SUBCASE 2
SPC = 3
TEMP = 1
```

请确保 SPC 的 ID 编号和载荷集 spc_struct 的 ID 编号一样，TEMP 的 ID 号码和换热工况的 ID 编号一样。

STEP 09 启动 RADIOSS

（1）在 Analysis 页面中单击 Radioss。

（2）单击 input file 输入区域右侧的 save as。

（3）选择 RADIOSS 结果文件存入的路径，在 File name 区域输入文件名 pipe_complete.fem，单击 Save。

（4）设置 export options 为 all，设置 run options 为 analysis，设置 memory options 为 memory default。单击 RADIOSS 按钮。

这将启动分析作业，如果分析成功完成，可以在选择的 pipe_complete.fem 文件存储路径中看到新的结果文件。pipe_complete.out 文件可用于查找错误信息，如果分析过程中出现错误，这些信息可以帮助进行模型的调试。

RADIOSS 计算了稳态传热分析的温度、梯度和流通量，以及结构分析的应力和位移。下面将采用 HyperView 对这些计算结果进行后处理。

STEP 10 查看传热分析的结果

（1）当从命令窗口中得到 Process completed successfully 的信息时，单击 HyperView 按钮，启动 HyperView 并加载结果文件。模型和结果文件加载成功时会出现一个信息提示窗口。

（2）单击 Close 关闭信息提示窗口。

（3）单击 Contour 工具按钮。

（4）在左侧视图窗口中单击 Load case view 按钮，在工况选项卡中选择 Subcase 1（heat_transfer）为当前工况，在下面的选项卡中选择 Heat Transfer Analysis 选项，如图 10–17 所示。

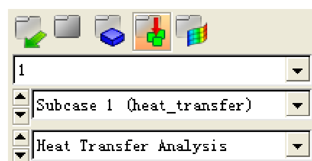


图 10–17　选择载荷步

（5）单击 Result type 下面的第一个下拉菜单并选择 Element Fluxes（V）。

（6）单击 Apply，可以看见热流量的结果云图。

（7）单击 Result type 下面的第一个下拉菜单并选择 Grid Temperatures（s）。

（8）单击 Apply。

热流量和温度结果云图如图 10–18 和图 10–19 所示。

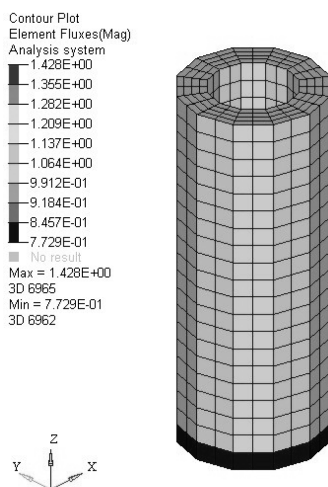


图 10–18　热流量云图

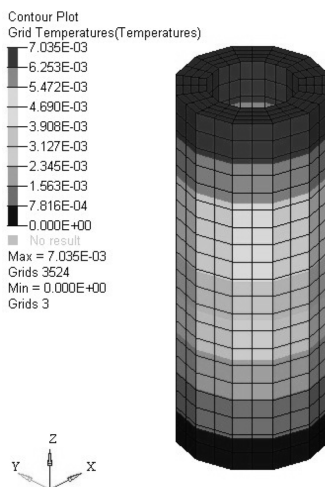


图 10–19　温度云图

STEP 11 查看热–结构耦合分析的结果

（1）在 Load Case and Simulation Selection 窗口选择 structure analysis SUBCASE 为当前工况。

（2）单击 Result type 下面的第一个下拉菜单，选择 Element Stresses[2D&3D]（t）。

（3）单击 Result type 下面的第二个下拉菜单，选择 vonMises。

（4）单击 Apply。

在等效应力云图中可以看到每一个单元上都有一种颜色，其表征了单元在施加在模型上的载荷和边界条件的工况下的应力大小。

（5）单击 Result type 下面的第一个下拉菜单，选择 Displacement（v）。

（6）单击 Result type 下面的第二个下拉菜单，选择 Mag。

（7）单击 Apply，查看模型的位移云图。

模型的应力和位移的结果云图如图 10−20 和图 10−21 所示。

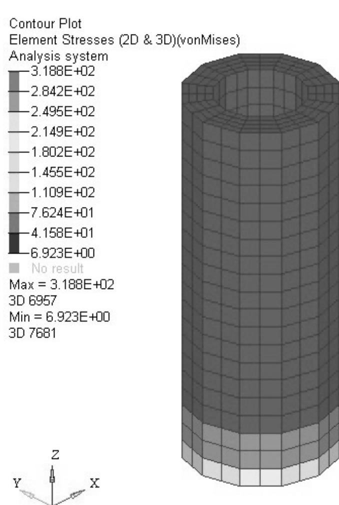


图 10−20　应力云图

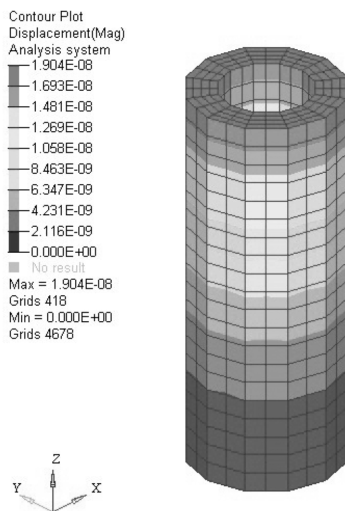


图 10−21　位移云图

10.3　本章小结

本章介绍了热应力分析、热传导分析和热力耦合分析的基本理论，通过实例介绍了热传导分析中温度边界、热流载荷的定义和耦合工况的定义等内容。另外，RADIOSS Bulk Data 目前无法进行瞬态热分析。目前一些更复杂的结构或流体的热分析可以在 HyperWorks 中的 Acusolve 中进行。

第 11 章



疲劳分析

疲劳失效是实际结构中最常见的失效方式之一。根据疲劳寿命的不同，疲劳失效又可以分为应力疲劳和应变疲劳。在 RADIOSS Bulk Data 中，可以采用 S-N（应力-寿命）和 E-N（应变-寿命）的方法进行疲劳分析。一般情况下，高周疲劳和低周疲劳的分界线为 10 000 个周期。低周疲劳常采用 E-N 方法计算疲劳寿命，此时塑性应变作为导致结构发生疲劳破坏的重要因素进行考虑。本章只介绍应力-寿命方法，有关应变-寿命的相关内容请参考在线帮助。

本章重点知识

11.1　应力-寿命疲劳分析基本理论

11.2　疲劳（应力-寿命）方法分析实例

11.3　本章小结

11.1 应力–寿命疲劳分析基本理论

应力–寿命方法可以很好地计算结构在受到弹性变形范围内的循环载荷作用下的疲劳寿命。在这种载荷作用下，通常结构可以承受较多周期的载荷的作用，疲劳寿命较长，所以通常称为高周疲劳。

11.1.1 S–N 曲线

应力–寿命方法需要用户提供材料的 S–N 曲线。典型的 S–N 实验曲线如图 11–1 所示。

当将 S–N 的测试数据通过双对数坐标绘制出 S–N 曲线时，名义交变应力的幅值 Sa 或应力范围 SR 与疲劳周期 N 对应，S 和 N 之间表现出线性关系，一般可以用一段或两段理想的直线表示。如图 11–2 所示。

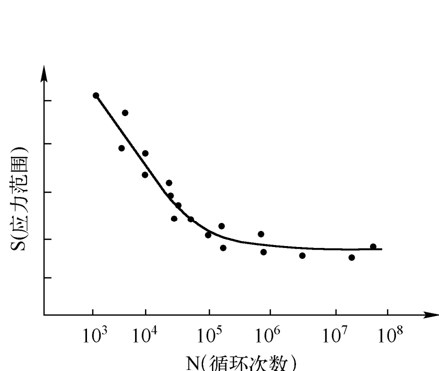


图 11–1 实验得到的 S–N 曲线的数据

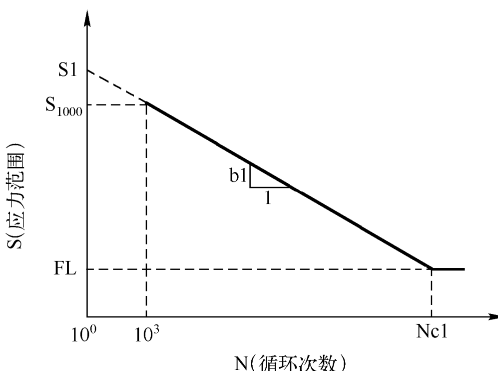


图 11–2 一段双对数坐标下的 S–N 曲线

名义应力计算公式见式（11–1）：

$$S = S_1(N_f)^{b1} \tag{11–1}$$

式中，S 是名义应力，N_f 是疲劳破坏周期，b_1 是第一疲劳强度指数，S_1 是疲劳强度系数。

S–N 方法是基于使材料发生弹性变形范围内的周期载荷作用建立起来的，因此应使用 S–N 曲线的寿命轴的数值大于 1 000 个周期部分以确保材料不发生明显的塑性变形。

11.1.2 等效名义应力

由于 S–N 理论使用单轴应力，所以应力分量需要在每一个时间步的每一个计算点合成为一个数值，作为 S–N 曲线的当量名义应力。

RADIOSS 可以使用各种应力组合类型，默认使用绝对最大主应力。一般情况下，绝对最大主应力适用于脆性材料，带符号的 von Mises 应力适用于塑性材料。正/负号根据绝对最大主应力方向确定。

11.1.3 平均应力效应

通常 S−N 曲线是通过对试样施加对称循环载荷的标准实验得到的。但是实际疲劳载荷不可能是完全的对称循环载荷，而名义平均应力对组件的疲劳性能有重要的影响。名义拉伸平均应力不利于材料的疲劳强度，而名义压缩平均应力有利于材料的疲劳强度。可以使用平均应力修正方法来考虑非零平均应力的影响。

Goodman 方法一般用于脆性材料的疲劳寿命计算，Gerber 方法适用于塑性材料的疲劳寿命估算。对 Goodman 方法而言，如果材料受到的拉伸平均应力大于材料的拉伸强度极限，那么就认为疲劳损伤程度大于 1.0；而 Gerber 方法中，不管是拉伸平均应力还是压缩平均应力大于材料的强度极限，都认为材料的损伤程度大于 1.0。

如果材料的疲劳失效的周期数一定，则应力幅值和平均应力在 Haigh 图表现为不同的曲线，如图 11−3 所示。

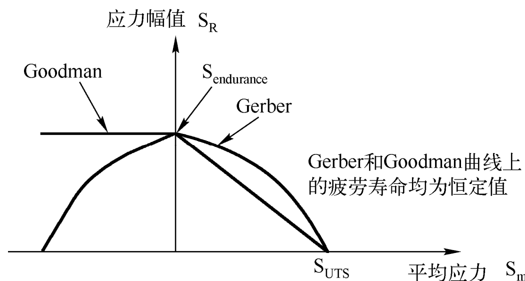


图 11−3 Haigh 图和平均应力修正方式

11.1.4 其他影响疲劳的因素

1．表面加工状况（光洁度和表面处理方式）

表面状况是影响疲劳强度的重要因素，因为疲劳失效在表面成核。为了修正疲劳分析的结果，必须考虑表面的光洁度和表面的处理方法的因素。

表面加工修正系数 C_{finish} 用来表征表面的粗糙程度。抛光、机加工、锻造等表面加工方式得到钢的表面质量，如图 11−4 所示。

表面处理可以改善部件的疲劳强度。表面状况可以考虑氮化、喷丸硬化、冷轧，也可以为表面处理系数 C_{treat} 定义一个具体的数值。

一般情况下，总表面修正系数计算方法见式（11−2）：

$$C_{sur} = C_{finish} \cdot C_{treat} \tag{11−2}$$

如果是氮化处理，那么总表面修正系数计算方法见式（11−3）：

$$C_{sur} = 2.0C_{finish} \quad (C_{treat} = 2.0) \tag{11−3}$$

如果表面处理方式是喷丸硬化和冷轧，总表面修正系数 $C_{sur} = 1.0$，这也意味着忽略表面

抛光的因素。

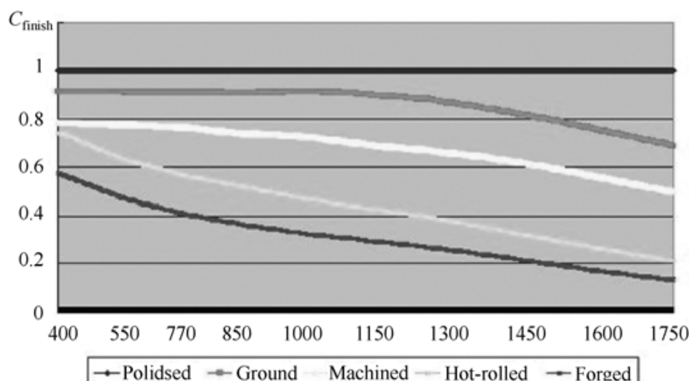


图 11–4 钢的表面处理修正系数

疲劳持久极限 *FL* 会随着表面修正系数 C_{sur} 改变，计算方法见式（11–4）：

$$FL' = FL \cdot C_{sur} \tag{11–4}$$

对于 S–N 曲线两个组成部分的过渡点的应力也通过与 C_{sur} 相乘而改变。

表面加工状况可以在 Bulk Data 的 PFAT 卡片中定义，然后在 SUBCASE 段使用 FATDEF 卡片将该表面处理状况与模型相关联。

2．疲劳强度折减系数

除了上面提到的影响疲劳强度的因素外，还有其他的因素也对结构的疲劳强度有影响，如切口的影响、尺寸的影响和载荷类型的影响等。为了综合考虑这些因素的影响，引入疲劳强度的折减系数 K_f 。疲劳持久极限会随着 K_f 改变： $FL' = FL / K_f$ 。

疲劳强度的折减系数可以在 Bulk Data 的 PFAT 卡片中定义，然后在 SUBCASE 使用 FATDEF 卡片将该表面处理状况与模型相关联。

如果 C_{sur} 和 K_f 的数值都确定了，那么疲劳持久极限 *FL* 可以按照式（11–5）获得：

$$FL' = FL \cdot C_{sur} / K_f \tag{11–5}$$

11.1.5 创建疲劳分析

当同时存在多个载荷工况而且每个工况都相互独立时，可以使用线性叠加原理将各工况组合在一起，然后再确定组合工况下各计算点的应力值。工况组合方程式见式（11–6）：

$$\sigma_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{n} \left(\frac{\sigma_{ij.k}}{P_{FEA.k}} P_k(t) \right) \tag{11–6}$$

式中，n 是所有工况的数量；$P_k(t)$ 和 $\sigma_{ij}(t)$ 分别表示第 k 个载荷时间历程的时间变量和总应力张量；$P_{FEA.k}$ 和 $\sigma_{ij.k}$ 分别表示有限元分析得到的第 k 个载荷的大小和应力张量。

11.1.6 压缩载荷时间历程

该操作的作用是节省计算时间。它会去除小周期（通过一个门槛值定义）和中间点。

在删除小周期的过程中，差值小于最大值与门槛值的乘积的相邻的转折点将从每个通道中删除，但是在不同的通道不同的时间出现的峰值或谷值之间的相位关系会保持不变，如图 11–5 所示。当门槛值的绝对值等于 1 时，在第一通道（图 11–5 的上半部分）中，时间值等于 4 和 5 的点会被删除；而在第二通道中（图 11–5 的下半部分），为了保持通道间的相位关系，时间值为 1 和 2 处的点将不会删除。

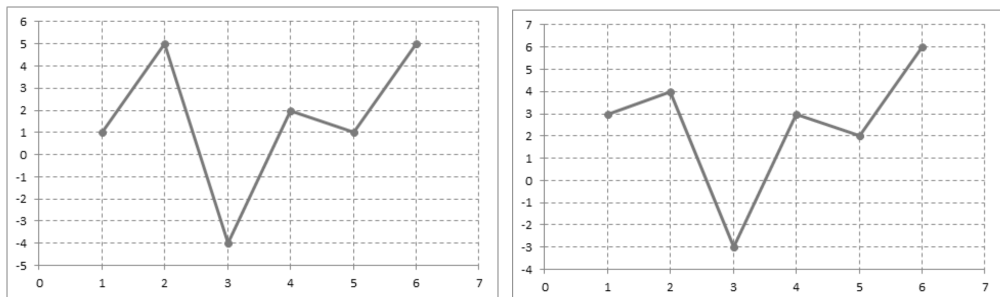


图 11–5　去除小周期示例

剔除中间点是节省计算时间的另一个重要途径。如果载荷时间历程中某些点既不是峰值也不是谷值，那么这些点对确定应力循环周期没有任何作用，在疲劳计算中剔除这些点不仅不会影响计算结果的精度，而且有利于节省计算时间。例如，图 11–6 中的左栏分别显示了 3 个超定位工况各自的 3 个载荷时间历程。在剔除中间点后，得到了图 11–6 右栏所示的 3 个载荷时间历程，使用右栏中的载荷时间历程计算疲劳可以用更少的计算时间得到与左栏的时间历程相同的疲劳结果。该方法在 RADIOSS 中是自动生效的。

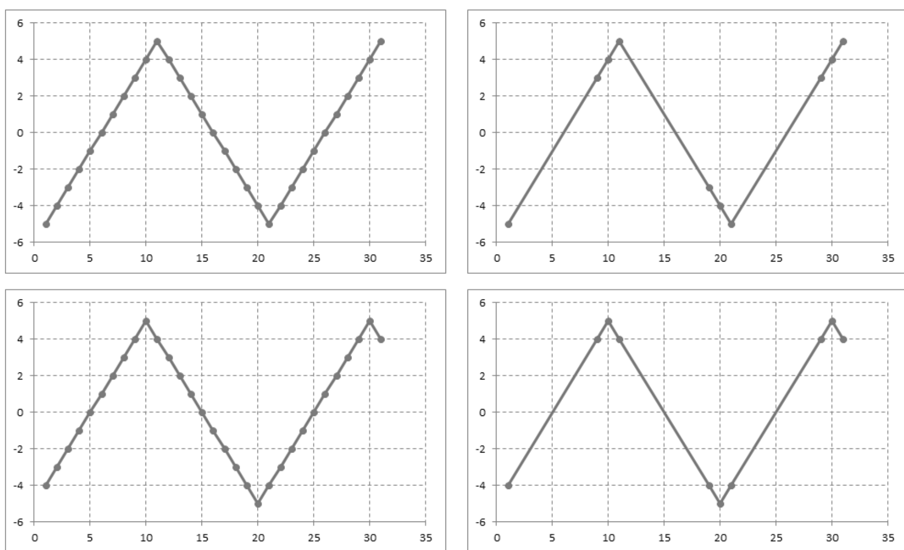


图 11–6　去除中间点示例

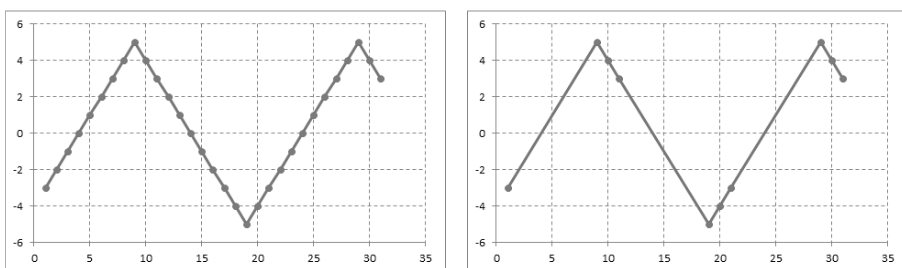


图 11-6　去除中间点示例（续）

11.1.7　疲劳载荷事件和序列

疲劳载荷通过使用时间历程对一个静力工况进行缩放来定义。

一个疲劳事件通过使用载荷-时间历程对在相同时间内作用的一个或多个静力工况进行缩放来定义。对于包含有多个静力工况的疲劳事件可以采用静载工况应力线性叠加的方法进行定义。

疲劳序列包含多个疲劳事件和这些事件的重复。疲劳序列中可以有其他子疲劳序列和子疲劳事件。采用这种方法可以为疲劳分析定义复杂的疲劳事件和疲劳序列。

在 RADIOSS 中，在疲劳工况中定义的疲劳序列（在 FATSEQ 卡片中定义）是基本的载荷加载块，这些疲劳工况的疲劳寿命结果是按照载荷加载块的重复次数来计算的。

图 11-7 是一个疲劳序列树状结构图的例子。疲劳序列可以在 RADIOSS 中定义：在 FESQ 卡片中定义疲劳序列，在 FEVN 卡片中定义疲劳事件。

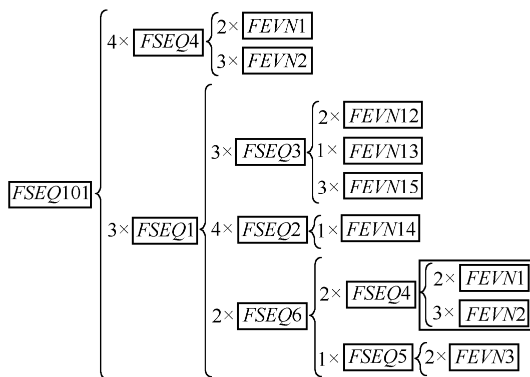


图 11-7　疲劳序列的树状结构图

疲劳载荷在 Bulk Data 的 FATLOAD 卡片中定义，在该卡片中可以关联静力工况和载荷时间历程。

疲劳事件在 Bulk Data 的 FATEVEVT 卡片中定义，在该卡片中可以选择一个或多个疲劳载荷。

疲劳载荷序列可以在 Bulk Data 的 FATSEQ 卡片中定义，在该卡片中可以定义一个或多个疲劳载荷事件或其他的载荷序列。SUBCASE 段的 FATSEQ 定义疲劳工况时需要参照 Bulk Data 段的 FATSEQ 卡片。

11.2　疲劳（应力-寿命）方法分析实例

本例通过疲劳计算流程管理器，利用 S-N 曲线方法评估疲劳寿命，主要包括如下内

容：启动疲劳分析流程管理器、导入模型、创建疲劳工况、定义疲劳分析参数、定义疲劳单元和 S−N 曲线属性、定义载荷的时间历程和加载顺序、提交分析作业、查看结果。

这个实例需要用到如下文件：ctrlarm.fem、load1.csv 和 load2.csv。这些文件可以在安装路径<install_directory>/tutorials/hwsolvers/RADIOSS/下找到。

本例采用一个加载了制动力和垂向力的控制手柄作为计算模型，如图 11−8 所示。图 11−9a 和图 11−9b 所示分别显示了频率为 1Hz、加载时长为 2 545s 的两个载荷的时间历程。由于断裂总是从表面上开始发生，所以在控制手柄的表面创建了覆盖实体单元的 Shell 单元，这也有利于改善计算精度。

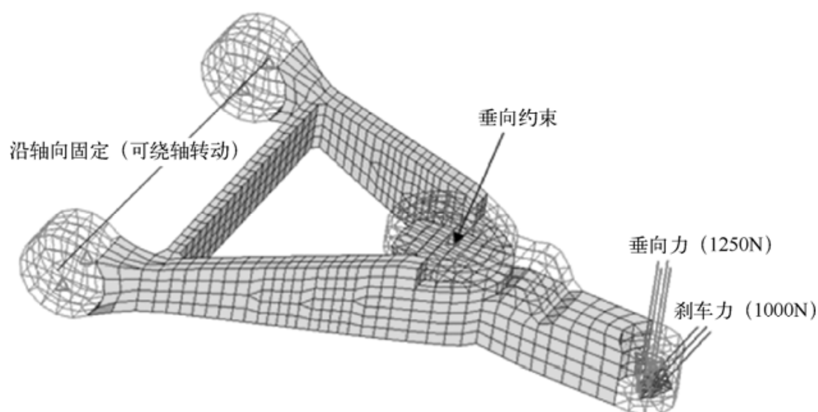
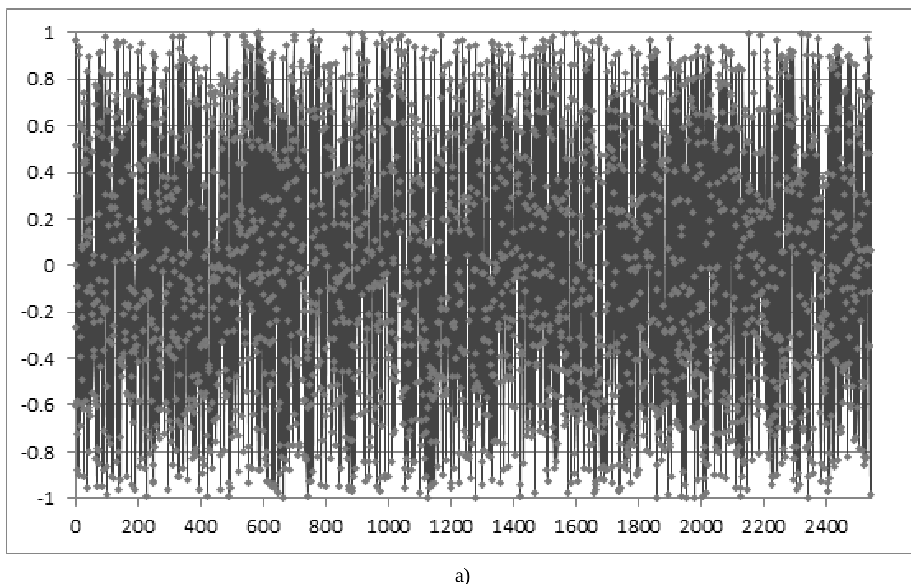


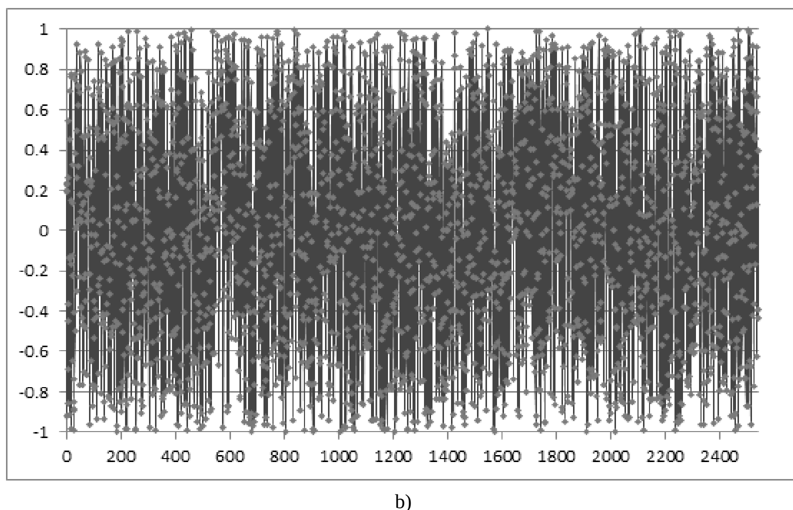
图 11−8　疲劳分析的控制手柄模型



a)

图 11−9　两个载荷的时间历程

a) 垂向力的时间历程



b)

图 11-9　两个载荷的时间历程（续）

b) 制动力的时间历程

STEP 01 启动 HyperMesh 11.0 和进程管理器

（1）启动 HyperMesh 11.0，出现 User Profiles 窗口。

（2）在 User Profile 对话框中选择 RADIOSS（Bulk Data）。

（3）单击 OK。

（4）在 Tools 菜单下，依次选择 Fatigue Process→Create New。

（5）分别在 New Session Name 和 Working Folder 右侧的文本框中输入名称和路径，单击 Create。这一步创建了一个文件，该文件用于保存当前加载的疲劳进程模板。

当进程管理器创建完成时，在左侧的视图窗口会出现 Fatigue Analysis，如图 11-10 所示。

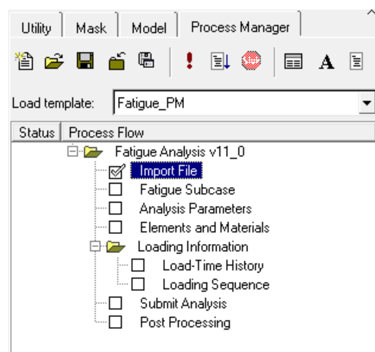


图 11-10　模型管理器启动后的视图

STEP 02 导入模型

（1）单击 Fatigue Analysis 下的 Import File。

（2）设置 Model file type 为 RADIOSS（Bulk Data）。

（3）单击 RADIOSS（Bulk Data）按钮，弹出 Open file 窗口。

（4）在安装目录<install_directory>/tutorials/hwsolvers/RADIOSS/下选择 ctrlarm.fem 文件。

（5）单击 Import，如图 11-11 所示。

这一步加载了控制手柄的模型。该模型中已经定义了两个静力工况、单元集和材料静态属性等。

（6）单击 Apply，可以进入 Fatigue Analysis 定义 Fatigue Subcase 任务。

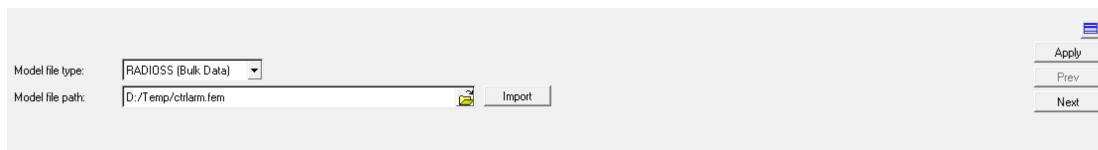


图 11-11　导入有限元模型文件

STEP 03 定义疲劳工况

（1）选择 Fatigue Analysis 下的 Fatigue Subcase 选项。

（2）在 Create new fatigue Subcase 文本框中，输入 fatsub_fpmtut。

（3）单击 Create。

（4）在 Select existing fatigue SUBCASE 选项区选择新创建的 fatsub_fpmtut 疲劳工况，如图 11-12 所示。fatsub_fpmtut 被激活成当前的疲劳工况，下面的定义（分析参数、疲劳单元和属性、加载顺序等）都将是针对这个工况进行的。

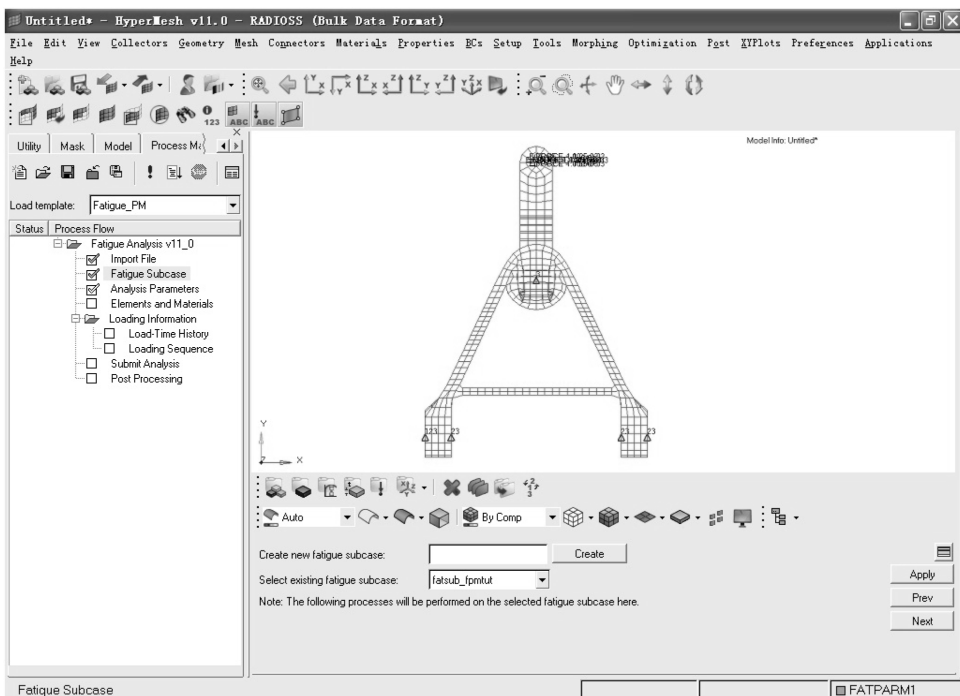


图 11-12　为进程创建并选择疲劳工况

（5）单击 Apply，可以进入 Fatigue Analysis 定义 Analysis Parameters 任务。

STEP 04 定义疲劳分析参数

（1）选择 Fatigue Analysis 下的 Analysis Parameters 选项。

（2）选择如下选项。

Analysis type：S−N
Stress combination method：Signed von Mises
Mean stress correction：GERBER
FEA stress unit：MPA
Rainflow type：STRESS

（3）输入如下数值：

Gate=0.0
Certainty of survival：0.5

设置结果如图 11−13 所示。

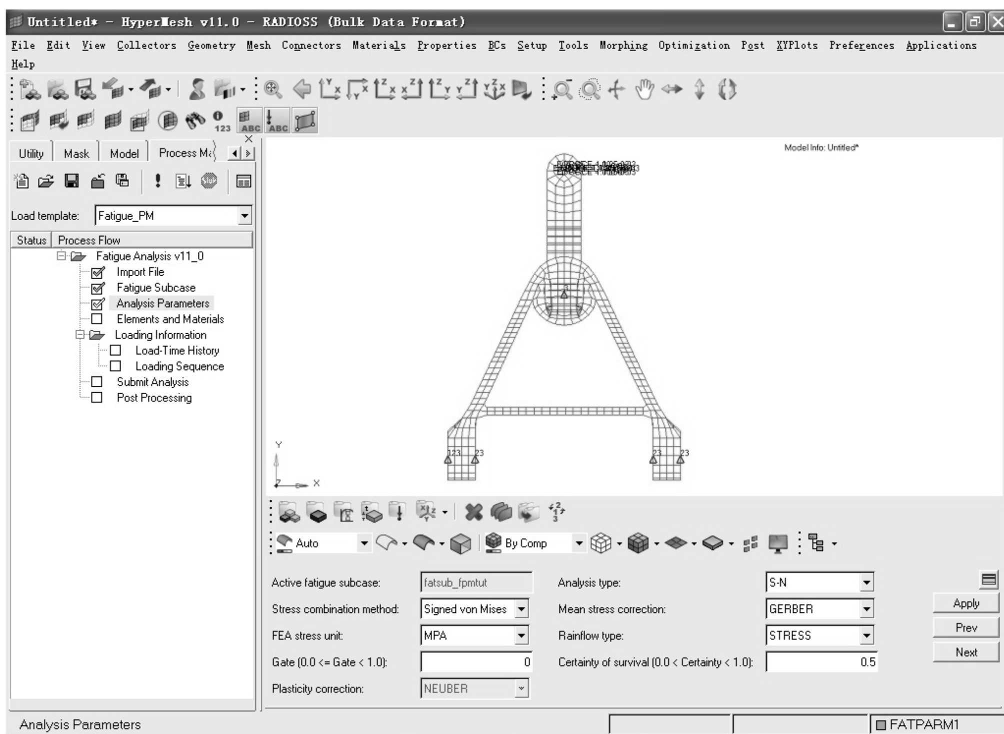


图 11−13　定义疲劳分析参数

（4）单击 Apply，可以进入 Fatigue Analysis 定义 Elements and Materials 任务。

STEP 05 定义疲劳单元和材料

（1）选择 Fatigue Analysis 下的 Elements and Materials 选项。
（2）单击 Add，弹出一个 Material Data 窗口。
（3）选择 Element entity type 为 Property − PSHELL。
（4）选择 Element entity name 为 shell。

这是覆盖控制手柄实体的表层壳单元。

（5）为了定义材料属性，选择 Ultimate tensile strength（UTS）。

（6）在 UTS 文本框中输入 600。

（7）关于定义 S–N 曲线的输入方式，选择 Estimate From UTS。

（8）单击 Show SN curve definition 按钮，弹出一个关于如何产生材料 S–N 曲线的窗口。

（9）单击 Close。

（10）选择 Material type 为 Aluminum，单击 Estimate。

所有定义 S–N 曲线需要的数据都自动定义了。

（11）单击窗口底部的 Plot SN Curve，显示 S–N 曲线。

（12）关闭 SN Curve plot 窗口。

（13）选择 Layer of stress results in shell elements 为 Top。

（14）为 Surface finish 选择 No Finish。

（15）选择 Surface treatment 为 No Treatment。

（16）Fatigue strength reduction factor 文本框中不输入任何数值。

（17）单击 Save 保存为所选的单元定义的 S–N 曲线信息，如图 11–14 所示。

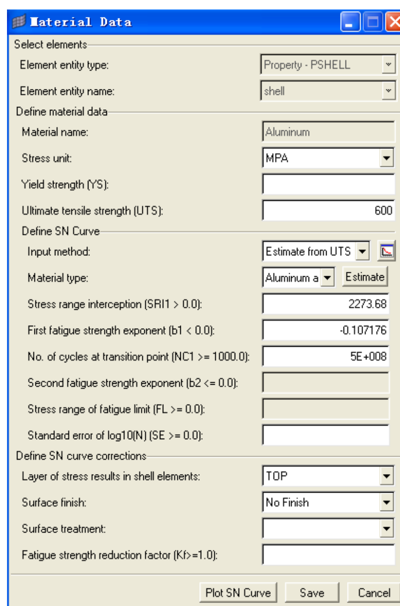


图 11–14　材料信息的定义

（18）单击 Apply，如图 11–15 所示。

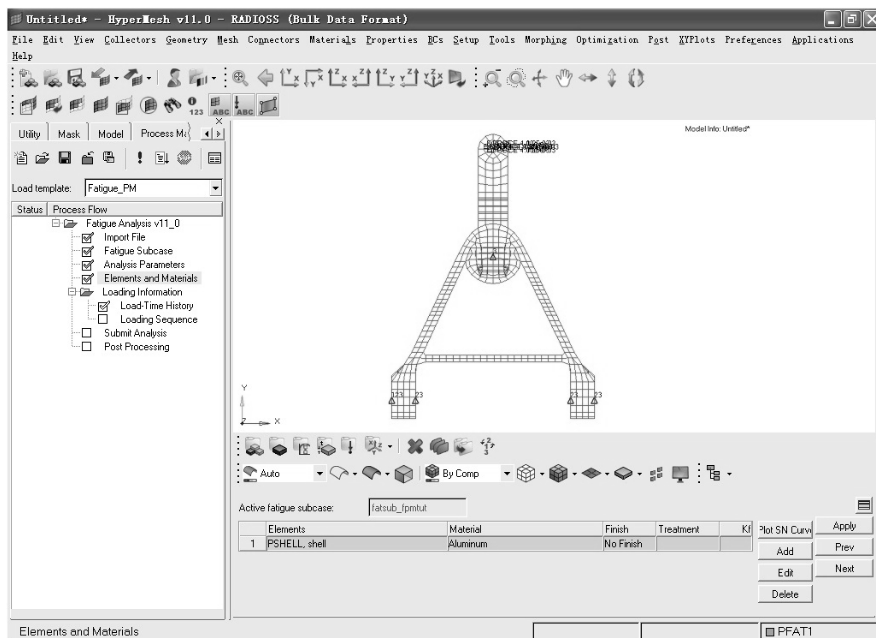


图 11–15　单元和材料的定义

这一步会保存当前所做的定义，并引导用户进入 Fatigue Analysis 定义 Load–Time History 任务。

STEP 06 定义载荷的时间历程

（1）选择 Fatigue Analysis 下的 Load–Time History 选项。

（2）单击 Add by File，弹出 Load Time History 窗口。

（3）在 Load–time history name 文本框中输入 lth1。

（4）选择 Load–time history 为 CSV。

（5）单击 Open load–time 按钮 。

（6）找到 load1.csv 文件。

（7）依次单击 Open→Import。

（8）单击 Save，将新的载荷时间历程加载到 HyperMesh 数据库。

（9）重复步骤（2）～（8），通过导入 load2.csv 文件创建第二个载荷时间历程 lth2，如图 11–16 所示。

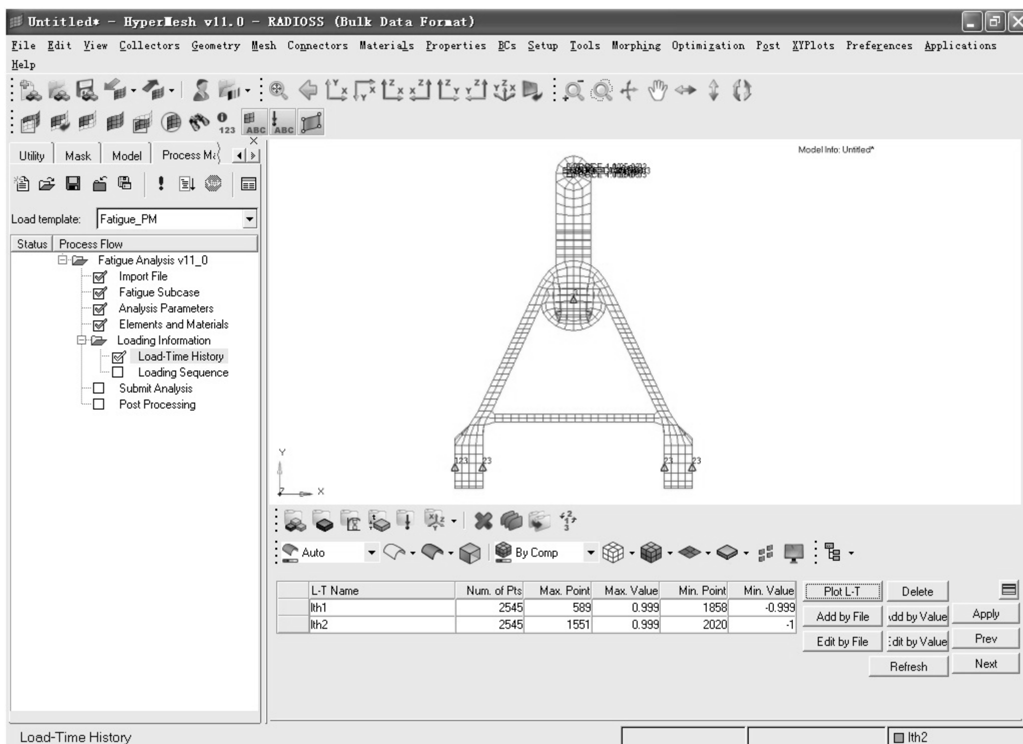


图 11–16　定义载荷的时间历程

（10）单击 Plot L–T 显示时间历程，如图 11–17 所示。

（11）关闭 Load Time History 窗口。

（12）单击 Apply。

这一步会保存当前所做的定义，并引导用户进入 Fatigue Analysis 定义 Loading Sequences 任务。



图 11-17　导入载荷时间历程

STEP 07 定义载荷顺序

这一步定义了一个连接两种载荷的时间历程的事件，即要求分析过程中两种时间历程的载荷的应力进行线性重叠。基于这种要求，需要创建载荷顺序。

（1）选择 Fatigue Analysis 下的 Loading Sequences 选项。

（2）单击 Add，弹出一个 Loading Definition 窗口。

（3）为 Select static loadcase 选择 SUBCASE1。

（4）为 Select load-time history 选择 lth1。

（5）在 Scale 文本框中输入 3.0。

（6）选中 Create new 单选按钮，选择 Create new 选项。

（7）在 Create new 右侧的文本框输入 Event1，作为新创建的疲劳事件的名称，如图 11-18 所示。

（8）依次单击 Save→Add，弹出一个 Loading Definition 窗口。

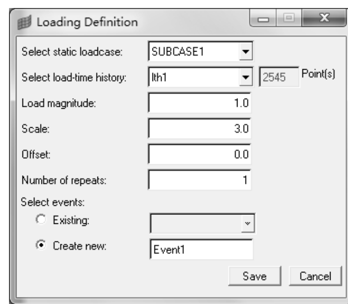


图 11-18　关联载荷时间历程和静力工况

（9）选择 Select static loadcase 为 SUBCASE2。

（10）选择 Select load-time history 为 lth2。

（11）在 Scale 右侧的文本框中输入 3.0。

（12）选中 Existing 单选按钮，选择 Existing 选项。

（13）选择 Existing 为 Event1。

（14）依次单击 Save→Apply，如图 11-19 所示。

这一步会保存当前所做的定义，并引导用户进入 Fatigue Analysis 定义 Submit analysis 任务。

STEP 08 提交疲劳分析作业

（1）选择 Fatigue Analysis 下的 Loading Sequences 选项。

（2）单击 Save .fem file 右侧的按钮，弹出一个 Save file 窗口。

（3）选择结果文件存入的路径，在 File name 文本框中输入文件名 ctrlarm_fpmtut.fem。

（4）单击 Save 关闭窗口。

（5）单击 Save 保存 RADIOSS 模型文件。

（6）选择 Run Option 为 analysis。

（7）单击 Submit，如图 11-20 所示。

这样就会启动 RADIOSS 11.0 并进行疲劳分析的计算。

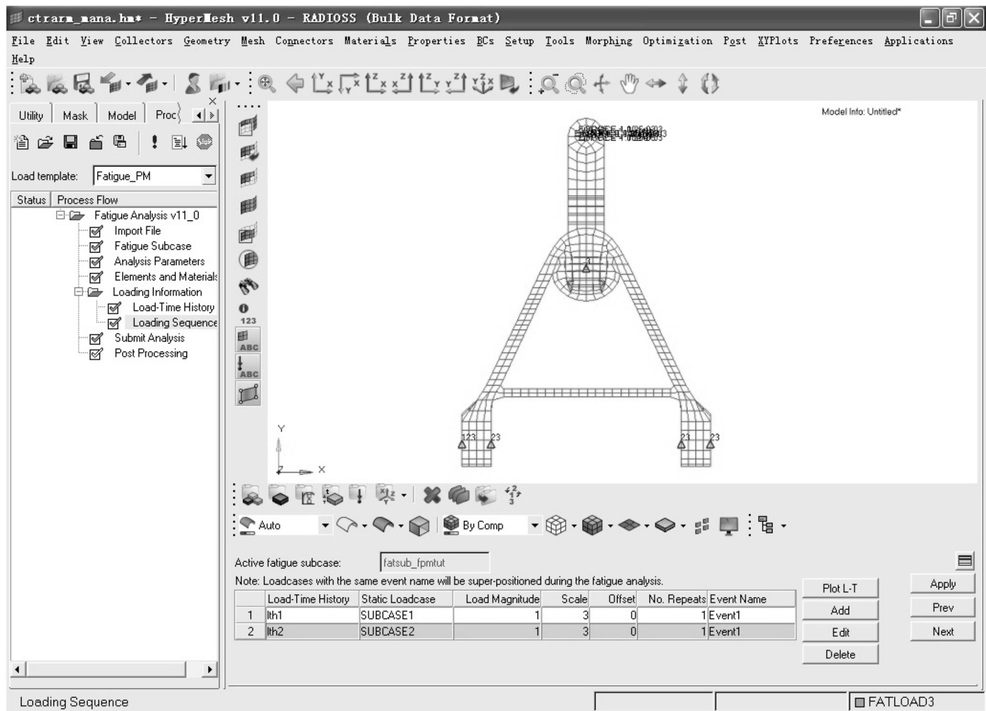


图 11-19　保存对载荷加载顺序的定义

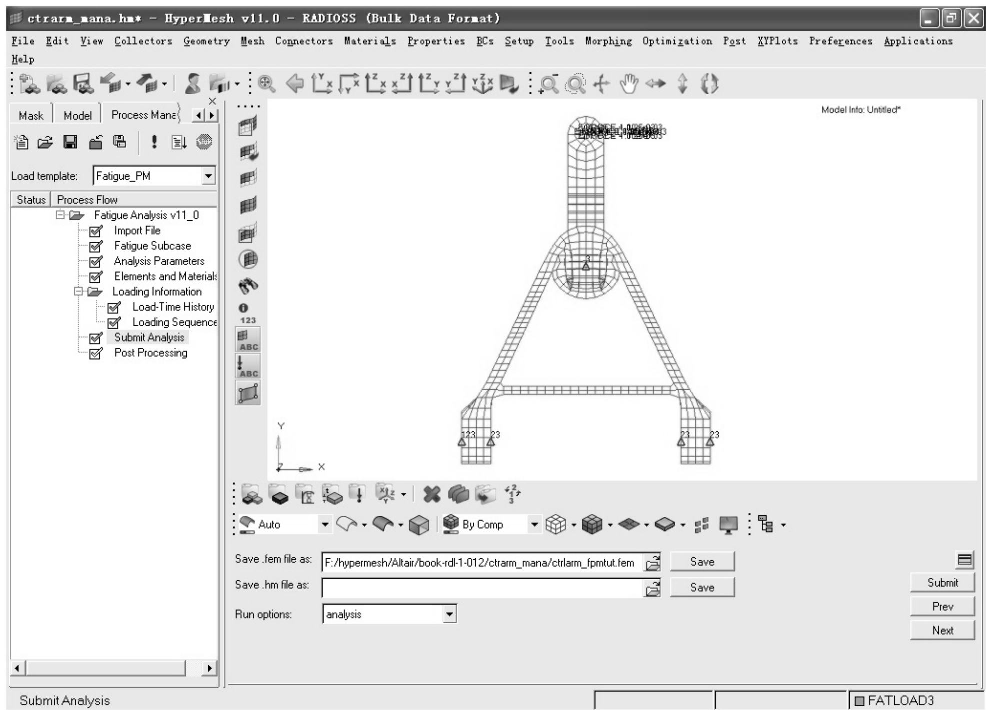


图 11-20　提交疲劳分析作业

如果计算过程成功，就会在 RADIOSS 工作目录中创建新的结果文件。

默认的输出到工作目录的文件如下。

ctrlarm_fpmtut.0.3.fat：ASCII 格式的文件。该文件包括每个疲劳工况的每个迭代步的计算结果。

ctrlarm_fpmtut.h3d：h3d 格式的结果文件。该文件同时包括静力分析和疲劳分析的结果。

ctrlarm_fpmtut.out：RADIOSS 的输出文件。该文件包括创建文件、定义疲劳问题和计算时间等具体信息，浏览该文件可以查看警告和错误。

ctrlarm_fpmtut.stat：分析过程的总结，提供计算过程中每个计算步的 CPU 信息。

STEP 09 后处理

（1）选择 Fatigue Analysis 下的 Post Processing 选项。

上一步提交的疲劳分析的计算成功完成后，会自动进入这个任务。

（2）查看疲劳寿命结果总结。

查看前 0.1%、1.0%和 5.0%的平均寿命和损坏最严重的 3 个单元的寿命，如图 11−21 所示。

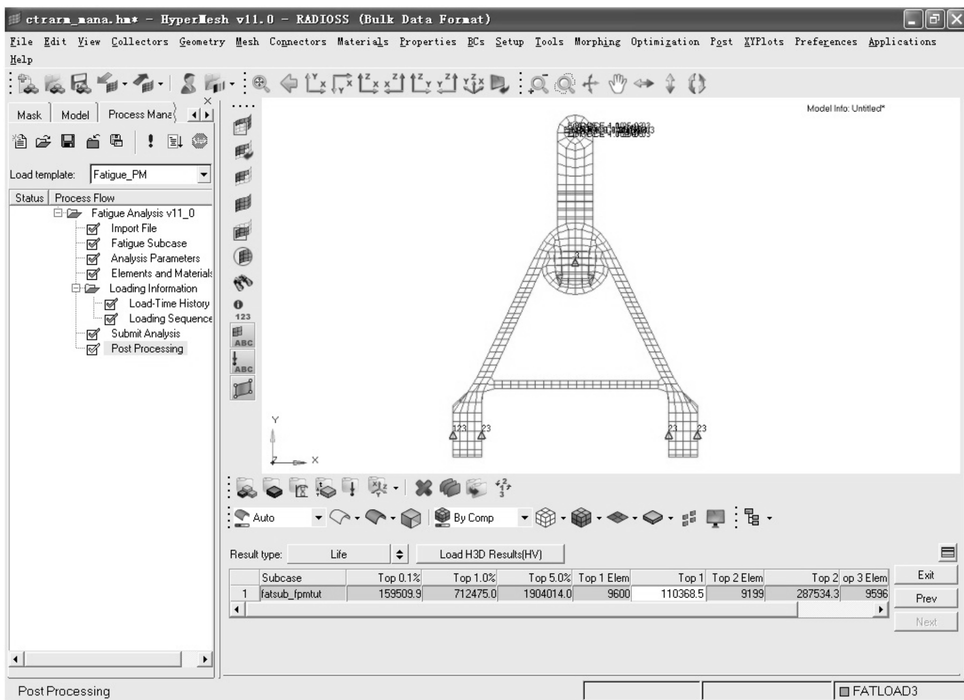


图 11−21　疲劳寿命计算结果概览

（3）切换 Result type 为 damage，查看疲劳破坏的结果。

（4）单击 Load H3D Results（HV），启动 HyperView 并加载 ctrlarm_fpmtut.h3d 结果文件，获得更加详细的结果信息。如图 11−22 所示。

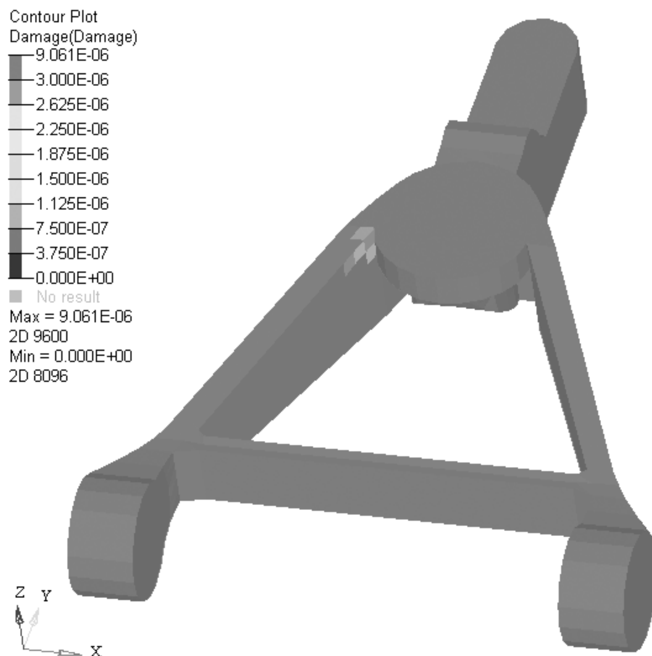


图 11–22　疲劳破坏结果云图

（5）单击 Exit 退出疲劳计算管理器。

11.3　本章小结

疲劳失效是实际结构中最常见的失效方式之一，由于其机理的复杂性目前还没有一种能彻底解决疲劳失效问题的统一理论。虽然目前疲劳寿命总体计算精度不高，但依然被广泛应用。例如，可以使用它预测结构在疲劳载荷作用下的薄弱部位等。RADIOSS 使用经典疲劳算法，疲劳分析中需要的输入数据中的很多影响因子，需要通过查手册或实验方法得到。如果实际中难以获得其准确值，则将导致使用软件进行疲劳寿命预测的计算精度受到限制。另外，RADIOSS 的疲劳分析功能也有一定的局限性，目前还无法进行焊点疲劳、振动疲劳等进行分析。

第 12 章

NVH 分析



本章介绍 HyperWorks 中针对 NVH 分析的相关功能。NVH 是振动、噪声和声振粗糙度的总称，在机械、车辆等各个领域有着广泛的应用。从分析类型来说，NVH 分析属于动力学分析的一种，其和频率响应分析所使用的计算方法类似，但在前后处理方面又有不同于普通频率响应分析的特点，比如 NVH 后处理经常需要查看模态贡献量、面板贡献量和进行传递路径分析等，为此 HyperView 有专门的 NVH 后处理模板提供相关功能。如果要进行声固耦合分析，则还需要划分声腔网格，目前可以在 HyperMesh 中完成。考虑到目前 NVH Director 模块的开发工作还在继续，完善的软件文档还在编写过程中，所以本章不打算对 NVH Director 模块做系统的介绍。本章介绍的内容包括声腔网格划分和一个 NVH 声固耦合分析简单案例。

本章重点知识

12.1　汽车声腔网格划分

12.2　声固耦合 NVH 分析

12.3　本章小结

12.1 汽车声腔网格划分

本节介绍声固耦合分析使用的声腔网格划分。声腔网格可以使用四面体网格、六面体网格或者是四面体和六面体的混合网格。由于汽车车身零件数量众多，而且有很多零件没有相应的网格模型，不同零件之间有间隙，划分四面体实体网格需要封闭的外表面网格，所以手工划分汽车声腔网格是一件工作量很大的工作。为此 HyperMesh11.0 中提供了声腔网格划分的专门工具。

STEP 01 设置 User Profile 为 RADIOSS Bulk Data

（1）启动 HyperMesh，弹出一个 User Profiles 的对话框。如果没有弹出，可以从工具栏中的 Preferences 下拉菜单进入。

（2）在 User Profiles 对话框中选择 RADIOSS。

（3）在右端的扩展列表中选择 Bulk Data，单击 OK。

STEP 02 打开 taurus.hm 模型

（1）单击 File→Open→Model。

（2）在安装目录下找到<installation_directory>/tutorials/es/nvh/acoustic.hm。

（3）单击 Open 打开模型文件，如图 12−1 所示。

STEP 03 隐藏座垫组件

（1）在 Model Browser 中，展开 Components 文件夹。

（2）从组件列表中选择 Rear_Seat_Cushion、IN−driver seat back cushion、IN−drv seat head rest、IN−driver seat lower cushion、IN−pass seat lower cushion 和 IN−pas seat head rest，如图 12−2 所示。

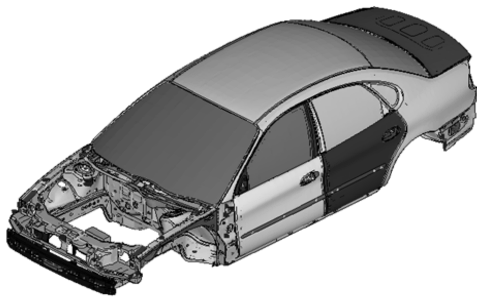


图 12−1　分析模型

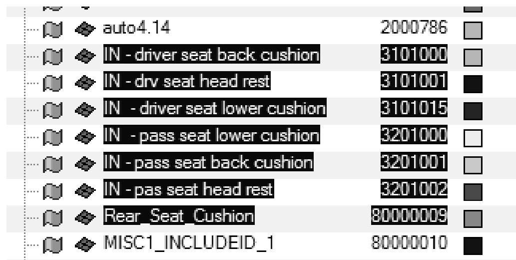


图 12−2　选择组件

（3）用鼠标右键单击并选择 Hide。

STEP 04 预览网格

导入的模型仅包含用来创建空腔网格的部分。在这个模型中座椅的空腔已经创建。

（1）单击 Mesh→Create→Acoustic Cavity Mesh，打开 Acoustic Cavity Mesh Generation 面板。

（2）单击 comps 打开 comps 选择面板。

（3）单击 comps，选择 displayed 选择所有组件。

（4）单击 select 完成选择。

（5）单击组件选择器 seats。

（6）单击 ›› 按钮进入最后一页。

（7）在这个页面中选择 IN – pass seat back cushion、IN – pas seat head rest 和 Rear_Seat_Cushion。

（8）单击前一页按钮返回至前一页并选择 IN – driver seat back cushion、IN – drv seat head rest、IN – driver seat lower cushion 和 IN – pass seat lower cushion。

（9）单击 select 完成 seats 选择。

（10）确认 seat coupling 切换到 node to node remesh。

（11）在 Oelement size = 文本框中输入 40。

（12）在 gap patch size = 文本框中输入 100。

（13）在 hole patch size = 文本框中输入 200。

（14）激活 create hole elements 选项。

（15）单击 preview 预览网格，如图 12-3 所示。

网格显示在绘图区域，Acoustic Cavity 面板显示在 browser 区域。

STEP 05 重新检查网格

（1）在 AcousticCavity 标签中，用鼠标右键单击 AC_Structural.1，在弹出的快捷菜单中选择 Isolate，如图 12-4 所示。

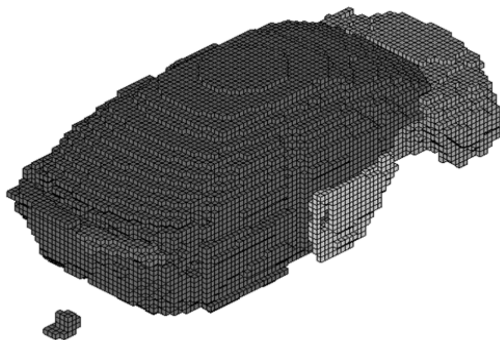


图 12-3　预览声腔

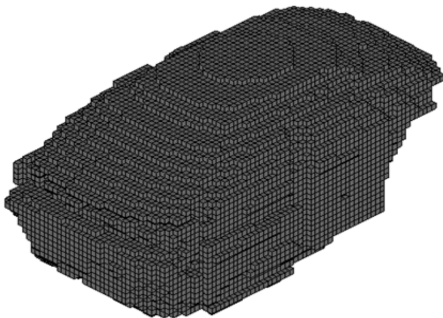


图 12-4　单独显示 AC_Structural.1

（2）在列表中用鼠标右键单击其他组件并选择 Show。

（3）用鼠标右键单击 AC_Structural.1，在弹出的快捷菜单中选择 Hide，结果如图 12–5 所示。

（4）单击每个 seat cavities 前面的 mesh 按钮 显示网格，如图 12–6 所示。

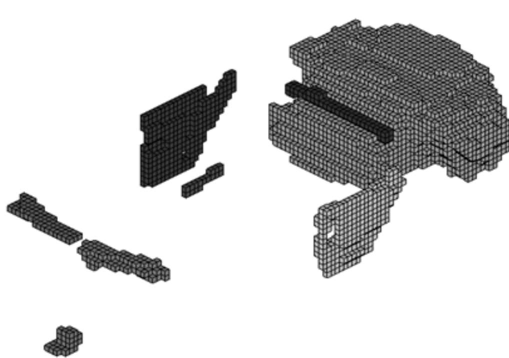


图 12–5　预览声腔

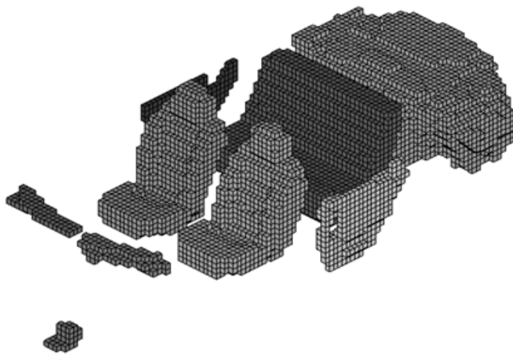


图 12–6　预览声腔

座椅被添加在可见的组件中。

（5）选择每个座椅空腔并用鼠标右键单击选择 Hide。

STEP 06 删除两个修补孔

（1）如图 331 所示，在 Model Browser 中，用鼠标右键单击^patched_holes 组件并单击 Show，结果如图 12–7 所示。

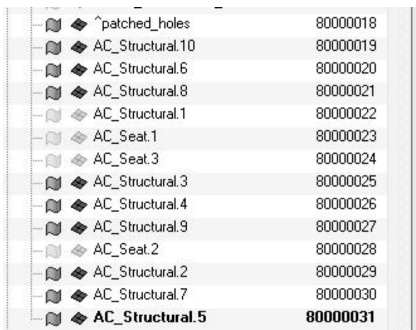


图 12–7　显示^patched_holes

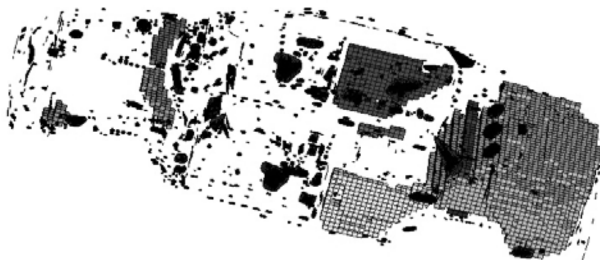


图 12–8　单元显示

（2）在图中缩放模型显示如图 12–9 所示。

（3）如果有必要，用鼠标右键单击 AC_Structural.4 并选择 Hide。

（4）单击查找按钮打开 find 面板。

（5）选择 find attached 子面板。

（6）改变 attached to 设置为 node。

（7）选择修补中心的节点，如图 12−10 所示。

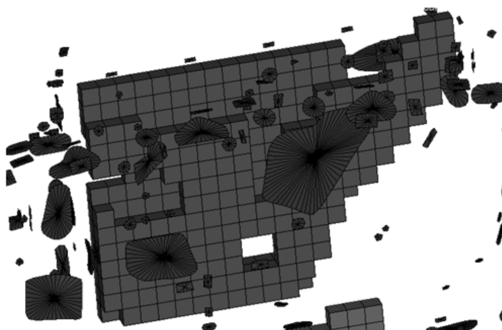


图 12−9　单元显示（一）

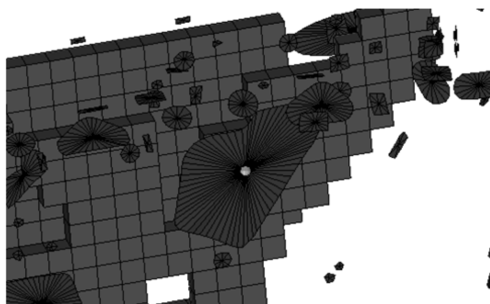


图 12−10　单元显示（二）

（8）单击 find 去查找与该节点相连的单元。
（9）单击 save found，便于以后选择这些单元。
（10）单击 return 离开面板。
（11）单击删除按钮打开 Delete 面板。
（12）设置选择为 elems。
（13）单击 elems→retrieve 选择步骤（9）保存的单元。
（14）单击 delete entity 删除单元。
（15）旋转模型显示如图 12−11 所示。
（16）重复步骤（5）～（15）删除另外一侧单元。
（17）单击 return 离开面板。

STEP 07 预览网格

在修补孔被删除之后，声腔网格将需要重新进行预览。
（1）在 AcousticCavity 标签中，单击 Reject，如图 12−12 所示。

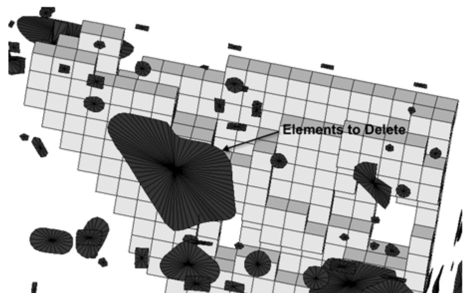


图 12−11　删除单元（一）

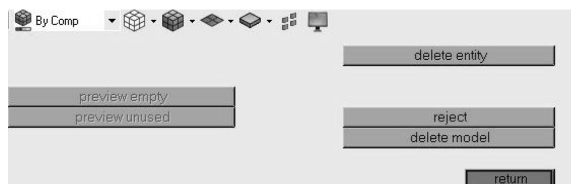


图 12−12　删除单元

（2）单击 Isometric Viewi 按钮，重置模型视图。
（3）单击 Mesh→Create→Acoustic Cavity Mesh，打开面板。

（4）单击 comps 打开 comps 组件选择面板。

（5）单击 comps→displayed，选择所有组件。

（6）单击 select 完成选择。

（7）打开 comps 选择器。

（8）单击 ›› 按钮进入最后一页。

（9）在这个页面中选择 IN – pass seat back cushion、IN – pas seat head rest 和 Rear_Seat_Cushion。

（10）单击前一页按钮返回至前一页并选择 IN – driver seat back cushion、IN – drv seat head rest、IN – driver seat lower cushion 和 IN – pass seat lower cushion。

（11）单击 select 完成 seats 的选择。

（12）在 element size = 文本框中输入 40。

（13）在 gap patch size = 文本框中输入 0。

（14）在 hole patch size = 文本框中输入 0。

（15）单击 preview 预览网格，如图 12-13 所示。

STEP 08 创建网格

（1）选择 AC_Structural.2～AC_Structural.10，用鼠标右键单击并选择 Hide，如图 12-14 所示。

（2）在 AC_Structural.2～AC_Structural.10 中，不要选中 Mesh 栏，如图 12-14 所示。

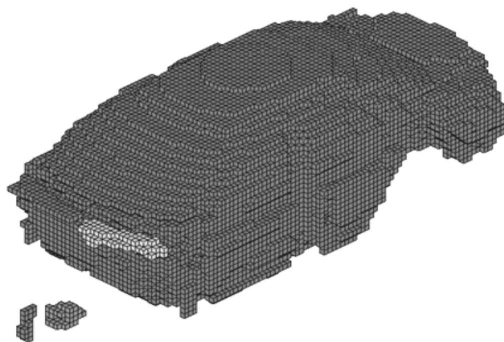


图 12-13　预览网格

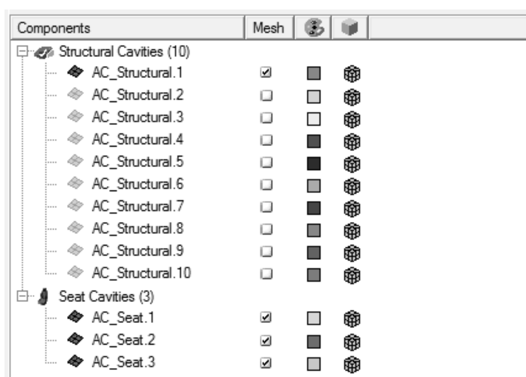


图 12-14　选择组件

（3）设置 Mesh type 选项为 Hexa-tetrahedra。

（4）设置 Response points 为 Read from file。

（5）单击浏览按钮浏览文件。

（6）选择 ACOUSTIC_RESPONSE_PTS.csv 并单击 Open，这样生成的声腔网格中会包含需要的响应输出点。

（7）单击 Mesh 创建网格，结果如图 12-15 所示。

（8）单击 Close 关闭 Acoustic Cavity 标签。



图 12-15　完成的网格

（9）单击 return 离开面板。

STEP 09 重新命名由 Acoustic Cavity Mesh 创建的组件

（1）在 Model Browse 中打开 Components 文件夹。
（2）用鼠标右键单击 AC_Structural.1 并选择 Rename。
（3）输入组件名 BODY_CAVITY 并按〈Enter〉键。
（4）用鼠标右键单击 AC_Seat.1 并单击 Rename。
（5）输入组件名 DRV_SEAT 并按〈Enter〉键。
（6）用鼠标右键单击 AC_Seat.2 并单击 Rename。
（7）输入组件名 REAR_SEAT 并按〈Enter〉键。
（8）用鼠标右键单击 AC_Seat.3 并单击 Rename。
（9）输入组件名 PASS_SEAT 并按〈Enter〉键。

STEP 10 为空腔创建材料卡片

（1）用鼠标右键单击 Model Browser 并选择 Create→Materia。
（2）设置 Type 为 FLUID。
（3）在 Name 文本框中处输入 BODY_CAVITY。
（4）在 Card image 处选择 MAT10。
（5）选中 Card edit upon material creation 复选框。
（6）不选中 Close dialog upon creation 复选框，因为还需要创建其他材料。
（7）单击 Create 创建材料并编辑材料卡片，如图 12-16 所示。
（8）在卡片编辑面板中单击[BULK]和[C]并保持默认值。
（9）单击 return 离开面板。
（10）保持 Create material 对话框打开，在 Name 文本框中输入 SEAT_CAVITY。
（11）单击 Create 创建材料。
（12）单击[C]并输入 8.8e+4。
（13）单击[BULK]接受默认值。
（14）单击 return 完成卡片编辑。
（15）单击 Cancel 关闭 Create material 对话框。

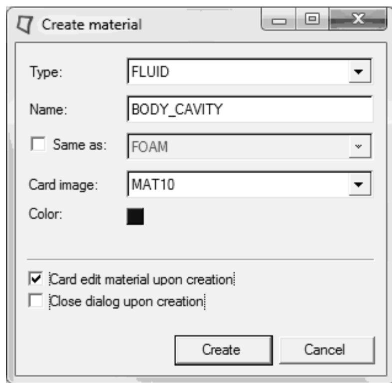


图 12-16　创建材料

STEP 11 创建模型属性

（1）在 Model Browser 上右键单击，并单击 Create→Property。
（2）将 Type 设置成 all。

（3）在 Name 文本框中输入 BODY_CAVITY。

（4）在 Card image 中选择 PSOLID。

（5）单击 Material 选项卡，将材料赋给属性。

（6）单击 Assign material 复选框激活。

（7）在 Name 文本框中选择 BODY_CAVITY。

（8）选中 Card edit upon material creation 复选框。

（9）不要选中 Close dialog upon creation checkbox，这样可以继续创建其他材料。

（10）单击 Create 创建属性，如图 12-17 所示。

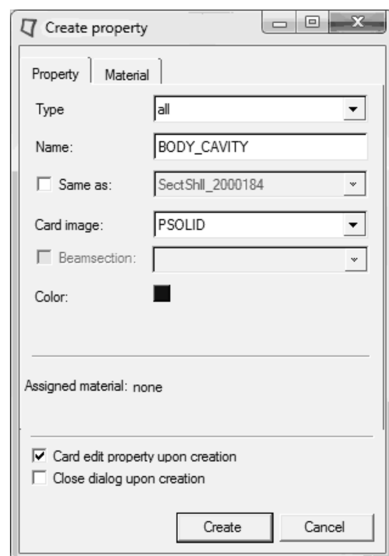


图 12-17　创建属性

（11）单击 FCTN 激活选项。

（12）单击 FCTN 区域并选择 PFLUID。

（13）单击 return 退出属性卡片信息。

（14）在 Create property 对话框中，单击 Property 选项卡。

（15）在 Name 文本框中输入 SEAT_CAVITY。

（16）单击 Material 选项卡，将材料赋给属性。

（17）单击 Assign material 复选框激活。

（18）在 Name 文本框中输入 SEAT_CAVITY。

（19）单击 Create 创建材料并编辑材料卡片。

（20）单击 FCTN 激活该选项。

（21）单击 FCTN 区域并选择 PFLUID。

（22）单击 return 完成卡片编辑。

（23）单击 Cancel 关闭 Create property 对话框。

STEP 12 关联属性到组件

（1）在 Model Browser 处，展开 Property 文件夹。

（2）用鼠标右键单击 SEAT_CAVITY 属性并单击 Assign。

（3）单击 elems→by collector，选择 REAR_SEAT、DRV_SEAT 和 PASS_SEAT 组件。

（4）单击 select 完成组件选择。

（5）单击 proceed 完成关联。

（6）用鼠标右键单击 BODY_CAVITY 组件并单击 Assign。

（7）单击 elems→by collector 并选择 BODY_CAVITY。

（8）单击 select 完成选择。

（9）单击 proceed 完成关联。

STEP 13 将节点、单元、属性和材料重新编号

（1）单击 Geometry→Renumber→Nodes，打开 Renumber 面板。

（2）单击 nodes→displayed 选择显示节点。
（3）在 start with 处输入 9000000。
（4）单击 renumber 重新编号节点。
（5）切换选择至 elems。
（6）单击 elems→displayed 选择显示的单元。
（7）单击 renumber 重新编号单元。
（8）切换选择至 props。
（9）单击 props 并选择 BODY_CAVITY 和 SEAT_CAVITY。
（10）单击 renumber 重新编号属性。
（11）切换选择至 mats。
（12）单击 mats 并选择 BODY_CAVITY 和 SEAT_CAVITY。
（13）单击 renumber 重新编号材料。
（14）单击 return 退出面板。

STEP 14 导出模型

（1）单击 File→Export→Solver Deck
（2）在 File Type 中选择 RADIOSS。
（3）对于 Template 选择 Bulk Data standard format。
（4）在 File 区域选择要保存的位置，并输入文件名 acoustic.fem。
（5）展开 Export options。
（6）在 Export 下拉菜单中选择 Displayed。
（7）选中 Write HM comments 复选框。
（8）单击 Export 导出模型，如图 12-18 所示。

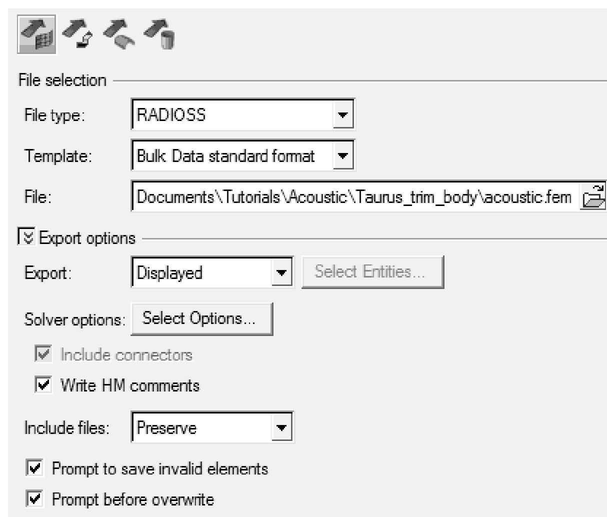


图 12-18　导出模型

STEP 15 编辑.fem 文件

编辑.fem 文件是为了移除 begin bulk 和 enddata 卡，这样以后可以将其作为一个 include 文件添加到一个整体的卡片文件中。

（1）使用文本编辑器打开 acoustic.fem。

（2）使用〈Ctrl+F〉组合键找到 BEGIN BULK。

```
INCLUDE 'U:/TAURUS/MODELS/BODY/BODY23.dat'
INCLUDE 'U:/TAURUS/MODELS/BODY_TRIM/IP.dat'
INCLUDE 'U:/TAURUS/MODELS/BODY_TRIM/FRONT_LEFT_DOOR.dat'
INCLUDE 'U:/TAURUS/MODELS/BODY_TRIM/FRONT_RIGHT_DOOR.dat'
INCLUDE 'U:/TAURUS/MODELS/BODY_TRIM/REAR_LEFT_DOOR.dat'
INCLUDE 'U:/TAURUS/MODELS/BODY_TRIM/REAR_RIGHT_DOOR.dat'
$$   TempU:/TAURUS/MODELS/BODY_TRIM/DECKLID.dat'
$$       U:/TAURUS/MODELS/CAVITY/FRONT_LEFT_SEAT_CUSHIONS.dat'
$$       U:/TAURUS/MODELS/CAVITY/FRONT_RIGHT_SEAT_CUSHIONS.dat'
$$ optist
$HMTAG(6600,9033679,1,4,"DRIVER LEFT EAR","")
$HMTAG(6601,9033678,1,4,"DRIVER RIGHT EAR","")
$HMTAG(6602,9033677,1,4,"PASS LEFT EAR","")
$HMTAG(6603,9033676,1,4,"PASS RIGHT EAR","")
$HMTAG(6604,9033675,1,4,"RR LF PASS LF EAR","")
$HMTAG(6605,9033674,1,4,"RR LF PASS RG EAR","")
$HMTAG(6606,9033673,1,4,"RR RG PASS LF EAR","")
$HMTAG(6607,9033672,1,4,"RR RG PASS RG EAR","")
$$END TAGS
$
BEGIN BULK
$$
```

（3）在文本中删除 BEGIN BULK。

（4）找到 ENDDATA。

```
$$  PSOLID Data
$$
$HMNAME PROP             9000000"BODY_CAVITY" 5
$HWCOLOR PROP            9000000       5
PSOLID   9000000 9000000                                  PFLUID
$HMNAME PROP             9000001"SEAT_CAVITY" 5
$$   TempPROP            9000001       5
$$       9000001 9000001                                  PFLUID
$$
$$ optist Data
$        AT              9000000"BODY_CAVITY" "MAT10"
$$-------MAT             9000000       5
---------90000000.142           340000.0
$$       AT              9000001"SEAT_CAVITY" "MAT10"
$HWCOLOR MAT             9000001       5
MAT10    90000010.142           84000.0
$$
$$----------------------------------------------------------------
----------------$
$$ HyperMesh Commands for loadcollectors name and color
information $
$$----------------------------------------------------------------
----------------$
$$
$$
ENDDATA
$$
```

（5）在文本中删除 ENDDATA。

（6）保存 acoustic.fem 文件。

现在.fem 文件可以被加入到一个整体卡片文件中了。

12.2 声固耦合 NVH 分析

该练习的模型已经定义好了组件、载荷和工况。接下来的练习中要学习定义 NVH 面板贡献量、节点贡献量和模态贡献量等的一些相关的输出以及在 HyperView 中观察结果。

STEP 01 选择 User Profile 文件并且找到 HyperMesh 模型文件

（1）选择 RADIOSS 作为求解类型并且在 User Profile 弹出视窗的对话框中选择 Bulk Data。

（2）在光盘中找到并打开 Half_car.hm 模型。

（3）观察模型有两个组件，一个是 fluid，另一个是 structure。隐藏 structure 网格，单击工具栏上的 Card Edit 按钮，切换至 nodes。选择模型上的一个节点，单击 edit，进入到新的页面，里边显示有勾选 CD−1，说明是流体。单击 return，切换至 props，选择模型，单击 edit，进入新的页面。在页面上有 [FCTN] PFLUID，同样说明是流体。而其他部分和结构体一样。单击 return 两次离开面板。

（4）模型中，fluid 是四面体单元，structure 是三角形单元。它们没有共节点，但是空间位置相同。隐藏 fluid 网格，重新显示 structure 网格。

STEP 02 定义 NVH 面板节点

（1）在 analysis 面板中，单击 entity sets。

（2）在 name = 文本框中输入 SETB。

（3）设置 no card image。

（4）nodes 中选择 19157 号节点。单击 nodes，选择 by id，输入 19157。

（5）单击 creat，如图 12−19 所示。

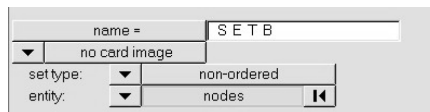


图 12−19　创建节点集（一）

这样在模型栏中可以看到创建了 SETB。

（6）接下来在同一面板上创建 panel 节点集，然后创建 panel 卡片。

（7）在 name = 文本框中输入 FRONT。

（8）选择面上的节点，注意去掉和别的面板公用的边界节点，如图 12−20 所示。

（9）单击 creat。

（10）重复 5 次步骤（7）−（9），分别创建 BACK、TOP、BOT、LEFT 和 RIGHT 等 5 个集合。

所选择的节点如图 12−21 所示。

（11）可以在面板中单击 review 查看所建立的节点集。

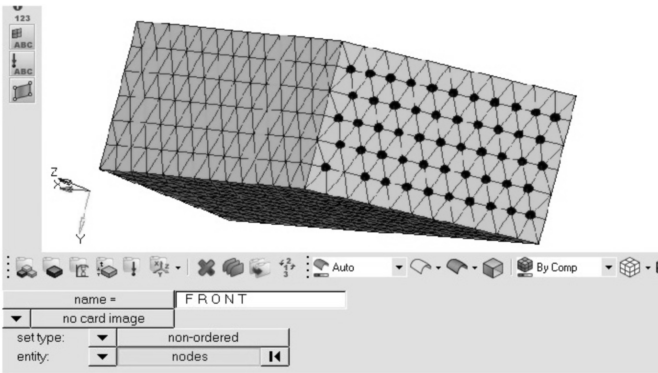


图 12-20　创建节点集（二）

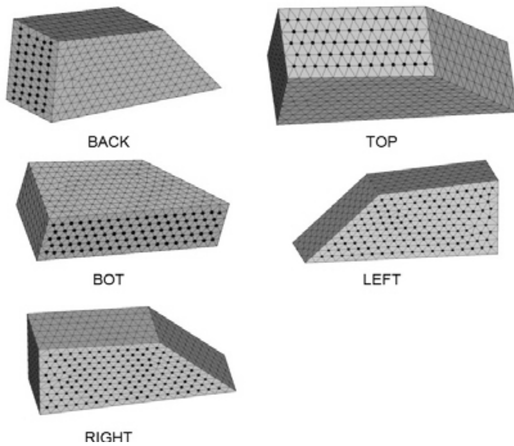


图 12-21　创建节点集（三）

STEP 03 创建面板卡片

（1）在 name = 文本框中输入 FRONT_P。

（2）card image 选择 PANEL。

（3）单击 sets 选择 FRONT。单击 create。

（4）重复 5 次步骤（1）～（3），分别创建 BACK_P、TOP_P、BOT_P、LEFT_P 和 RIGHT_P，如图 12-22 所示。

SETA	1
SETB	2
FRONT	3
BACK	4
TOP	5
BOT	6
LEFT	7
RIGHT	8
BACK_P	9
FRONT_P	10
TOP_P	11
BOT_P	12
LEFT_P	13
RIGHT_P	14

图 12-22　创建的节点集（四）

STEP 04 创建贡献量输出卡片

（1）从 Analysis 页面中进入 control cards。

（2）单击 next，选择 PFGRID。选中 GRIDS 和 GRIDF，分别表示流体和结构体的贡献量。

（3）SETG 和 SETFL 都选择 ALL，SETDOF 选择 SETA，如图 12-23 所示。

（4）单击 return 离开面板。



图 12–23　创建 PFGRID 卡片

（5）选择 PFMODE，创建模态贡献。选中 STRUCTURE，在弹出的子菜单中选择频率 FREQUENCY。在 SETDOF 中选择 SETB，可以看到在其下方出现 2。选中 FLUID，在弹出的菜单中选择阻尼和频率，分别为 FLUIDMP、STRUCTMP、PANELMP 和 FREQUENCY。在其上方的 FMP、SMP、SETP 和 SETF 中都选择 ALL，在 SETDOF 中选择 SETA，其下方出现 1，如图 12–24 所示。

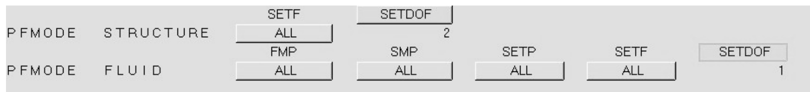


图 12–24　创建 PFMODE 卡片

（6）单击 return 离开面板。

（7）单击 next，选择 PFPANEL，创建面板贡献。

（8）选中 PANEL 和 FREQUENCY。SETP 和 SETF 都选择 ALL。SETDOF 选择 SETA，其下方出现 1，对流体面板计算贡献量，如图 12–25 所示。



图 12–25　创建 PFPANEL 卡片

（9）单击 return 两次离开面板。

STEP 05　导出文件重新编辑

（1）单击工具栏上的按钮，选择所要保存的目录文件夹，单击 Export，按如图 12–26 进行设置。

（2）找到刚才保存的文件，用文本格式打开，并修改 SET 2 = 19157 为 SET 2 = 19157/ T2,19157/T3。

注意：一定要在英文输入法下输入。

（3）单击保存。

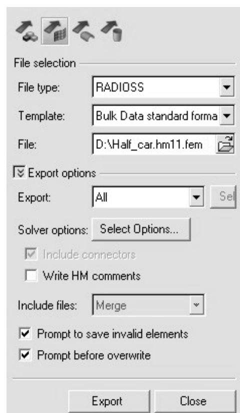


图 12–26　输出模型

STEP 06　运行求解

（1）启动运行 RADIOSS。

（2）如图 12–27 所示，在 Input file（s）中选择刚才保存的文件。

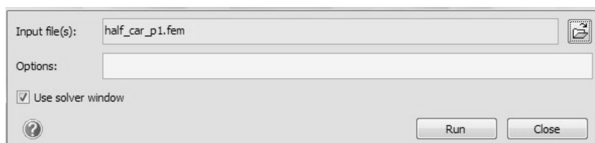


图 12–27　提交作业

（3）单击 Run。

STEP 07 查看结果文件

（1）计算完成后，启动 HyperView。
（2）单击 File 选择 Load，在弹出的 Preferences 中选择 NVH Utilites。
（3）单击 Load，这时在工具栏上方出现 NVH 下拉菜单。
（4）单击 NVH 下拉菜单，选择 Model/Panel Participation。
（5）这时，在左边 NVH Utilites 的处弹出下拉列表，选择刚才求解的.pch 文件。
（6）单击 Load，加载文件，如图 12−28 所示。
（7）选择感兴趣的工况、结果类型等观察结果，单击 Load Response。
（8）单击 Display，视图如图 12−29 所示，后处理结果如图 12−30 所示。

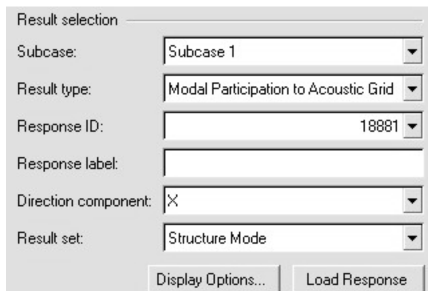


图 12−28　选择结构工况

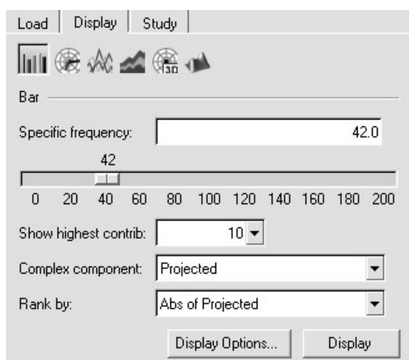


图 12−29　模态贡献量分析后处理界面

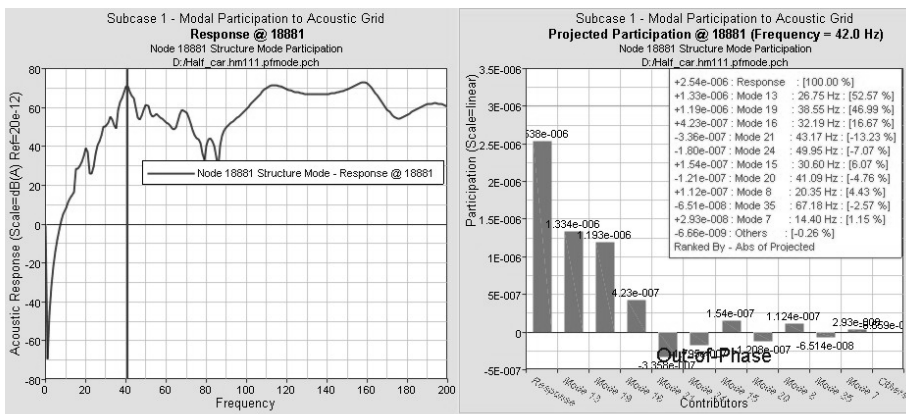


图 12−30　模态贡献量柱状图

（9）单击 Polar 按钮，单击 Display，显示如图 12−31 所示。
（10）单击 2D Line 按钮，单击 Display，显示如图 12−32 所示。
（11）单击 Sand Dune 按钮，单击 Display，显示如图 12−33 所示。

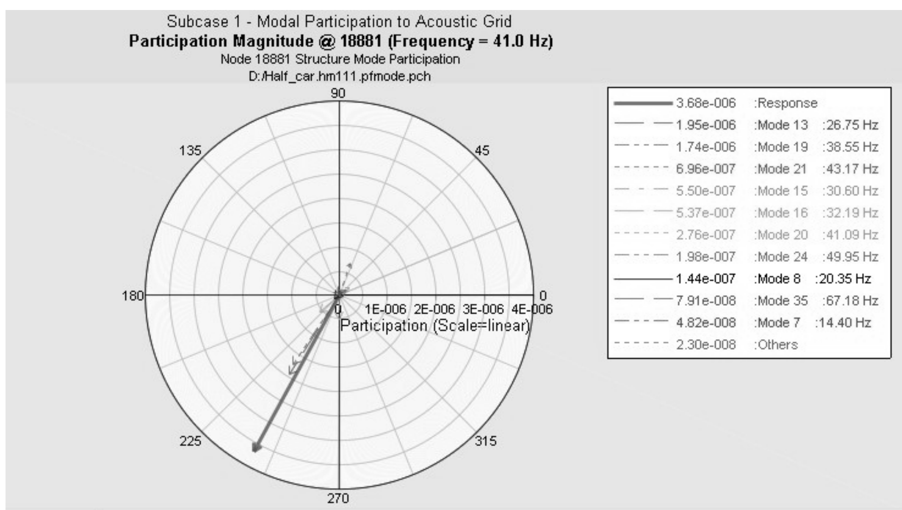


图 12−31　模态贡献量极坐标图

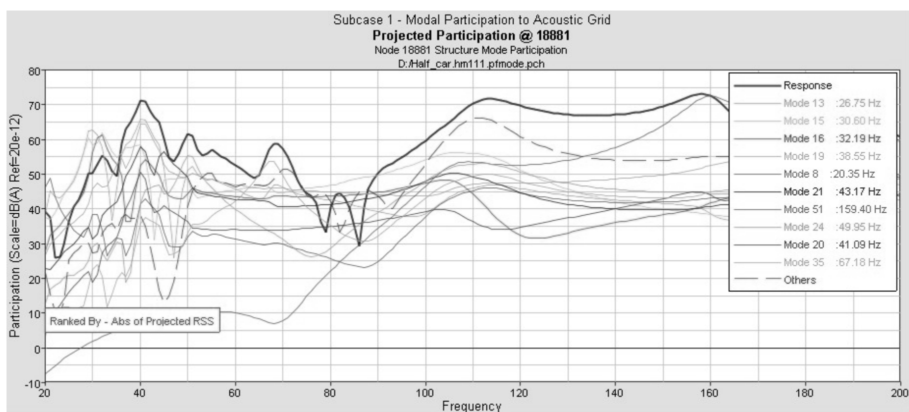


图 12−32　模态贡献量曲线图

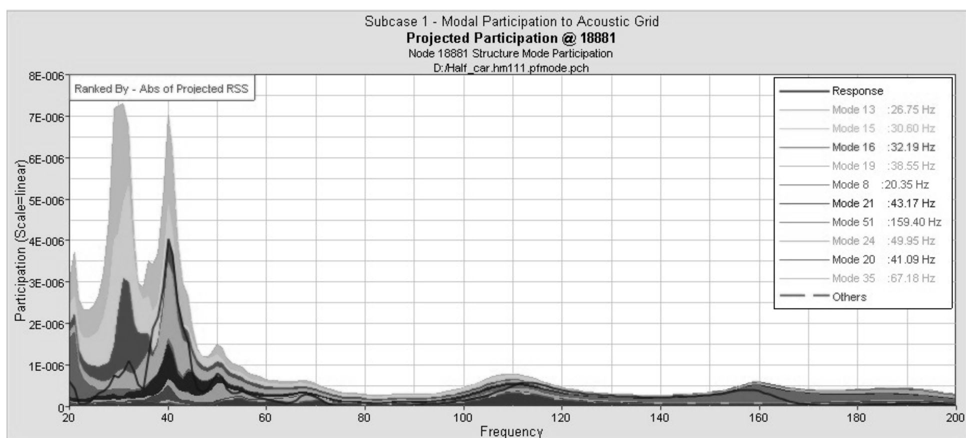


图 12−33　模态贡献量沙图

（12）单击 3D Surface 按钮，单击 Display，显示如图 12−34 所示。

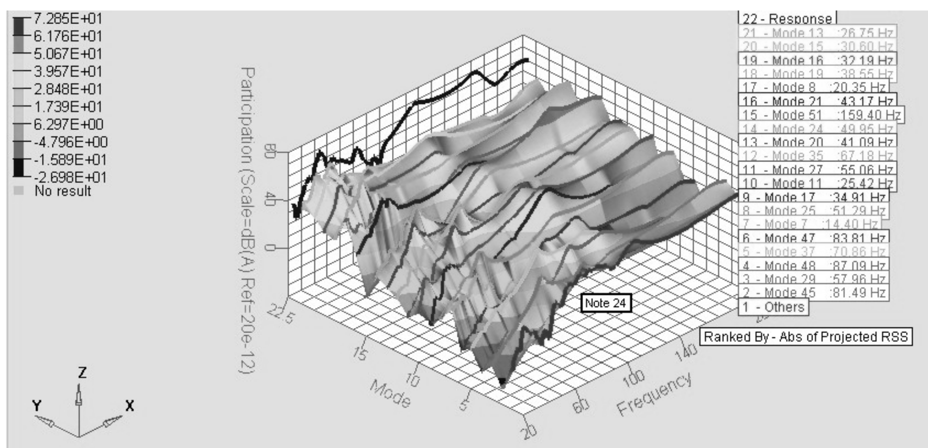


图 12−34　模态贡献量 3D 曲面图

12.3　本章小结

HyperWorks 可以进行整车及其他系统的 NVH 分析前处理、求解和后处理，特别是 NVH Director 在整车 NVH 分析方面功能强大。NVH Director 的建模思想基于模块，可以管理复杂的模型和工况。本章介绍的内容只是整个 HyperWorks NVH 功能的一小部分，还有很多重要的内容，如超单元的创建、NVH 流程自动化工具、整车装配模块、传递路径分析方法等都没有介绍，读者可以自己参照帮助文件进行学习。

第 13 章

RADIOSS Block 概述



RADIOSS 是一个先进的集成了显式和隐式的有限元求解器，可以对多种工程问题提供解决方案，从线性静力学和线性动力学到复杂的非线性瞬态动力学和机械系统。这个强大的多学科求解器能够使设计者在耐久性、NVH、碰撞、安全、可加工性、流固耦合方面性能最优化，使创新的产品尽快投入市场。

本章重点知识

13.1　RADIOSS Block 历史沿革

13.2　RADIOSS 功能

13.3　RADIOSS Block 文件格式系统

13.4　RADIOSS 输入文件

13.5　前处理器 HyperCrash 介绍

13.6　本章小结

13.1 RADIOSS Block 历史沿革

1987 年，法国 Mecalog 集团第一次推出了 RADIOSS 的商业版本，支持对机械、结构、流体和流固耦合现象在准静态和动态过程中的仿真。此后不久，RADIOSS 就被广泛应用于碰撞安全、冲压和液压成形、空气声学、结构波传播等问题，获得广泛赞誉，并成为 PSA 和 Ford 汽车等公司首选的碰撞安全分析工具。

2006 年，Altair 公司收购了法国 Mecalog 集团及其 RADIOSS 软件。收购完成之后，Altair 公司把旗下的子产品进行了重新整合，其中的有限元求解器产品统一到了 RADIOSS 这个品牌下。它包括两个子产品 RADIOSS Block 求解器和 RADIOSS Bulk 求解器。其中，RADIOSS Block 求解器就是原法国 Meclog 集团的 RADIOSS，其输入文件格式是 Block format；而 RADIOSS Bulk 求解器实际上就是 OptiStruct，只是剥离了其原有结构优化的功能。从 12.0 版本开始，RADIOSS Bulk Data 将改回原来的名称 OptiStruct。

目前 RADIOSS Block 在全球拥有超过 500 家商业客户，包括空中客车（Airbus）、阿尔斯通（Alstom）、欧洲防务（EADS）、菲亚特（Fiat）、法拉利（Ferrari）、福特（Ford）、本田（Honda）、马自达（Mazda）、日产（Nissan）、雪铁龙（Citroen）和沃尔沃卡车部门（Volvo）。

2005 年，用 RADIOSS Block 设计的 22 款汽车中，有 9 款获得了当年 EuroNCAP 颁发的最高五星安全评价。2008 年，EuroNCAP 碰撞安全评价最高的 5 款大型家用车里，有 4 款是使用 RADIOSS Block 进行碰撞安全设计的；评价最高的 5 款微型车里，有 3 款是使用 RADIOSS Block 进行碰撞安全设计的。而现在，全球排名前十的汽车制造商中，有 5 家在使用 RADIOSS。

13.2 RADIOSS 功能

RADIOSS 使用最新的数值公式和快速有效的求解方法，通过两种输入格式对线性和非线性有限元分析、钣金冲压、多体动力学来实现综合的分析功能，其分析能力可与其他公认的有限元和多体动力学求解器相比。部分实例分析的问题如下：

- 整车模态分析。
- 零部件的应力分析，如支架、杠杆、变速器、开闭件以及子系统（如传动系统）。
- 热传递和热应力分析。
- 整车碰撞分析。
- 车辆乘员的安全分析。
- 消费品的跌落实验。
- 汽车和航天器结构刚度、模态分析。
- 筋和梁结构建模分析，如桥梁和汽车。
- 航空航天结构的线性屈曲分析。
- 车辆和车辆组件在驾驶时的频率响应分析。
- 橡胶密封件的接触和变形分析。

- 汽车悬架系统的惯性释放分析。
- 车辆动力学分析。
- 汽车悬架的操稳分析。
- 刚体和柔体机械的分析。

其中，RADIOSS Block 格式的有限元仿真包含以下内容：

- 显式动力学分析。
- 非线性隐式静力学分析。
- 瞬时热传体和热力耦合。
- 显式任意拉格朗日欧拉（ALE）公式。
- 显式计算流体动力算法（SPH）。
- 使用自适应网格的钣金冲压分析。
- 线性静力学分析。
- 模态分析。
- 线性非线性屈曲分析。

所有典型的约束类型，如铰接、齿轮、耦合器、自定义的约束和高对铰接都可以被定义。高对铰接包括点到线、点到面、线到线、线到面、面到面的约束。它们可以连接刚体、柔体或刚柔结合体。对于多体动力学仿真，Altair Motion 求解器已经与 RADIOSS 集成。

13.3 RADIOSS Block 文件格式系统

本节将向用户介绍 RADIOSS Block 软件的基本框架结构、文件体系及求解器输入文件构成。

RADIOSS 安装完成后，可以在开始的 AltairHyperWorks 程序启动栏中找到 RADIOSS 图标，用户可以通过用鼠标单击该图标的方式，启动 RADIOSS 求解器，如图 13-1 所示。

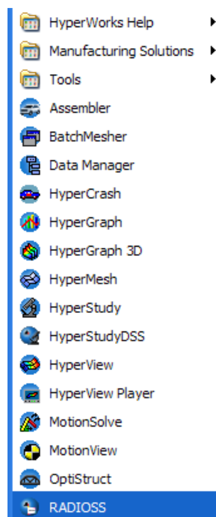


图 13-1 启动 RADIOSS 求解器

启动完成的 RADIOSS 求解器界面如图 13-2 所示，包括模型文件递交文本框（Input File）、求解参数设置文本框（Options）、Run 按钮和 Close 按钮等。

关于 RADIOSS 求解器的详细技术参数及用户手册等帮助信息，则可以在如图 13-3 所示的 Altair HyperWorks 在线帮助文档中找到。

图 13-4 给出了 RADIOSS Block 基本的求解器体系结构。用户通过前处理工具生成的求解器输入文件包括_0000.rad/D00 文件和_0001.rad/D01 文件。其中_0000.rad/D00 文件为基本的求解器输入文件。该文件中包含了有限元求解所包括的节点、单元信息，以及用于满足求解的材料模型、单元类型和各类边界条件信息。将_0000.rad/D00 文件递交给求解器后，求解器将自动将该文件分解为列表文件_0000.out/L00 和实际用于递交求解的_0000.rst/R00 文件。



图 13-2　RADIOSS 求解器界面

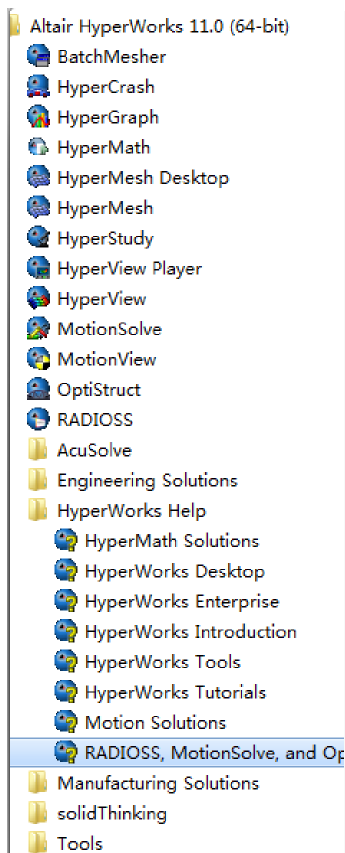


图 13-3　在线帮助文档

由用户生成用于递交求解器的求解文件还包括求解控制文件_0001.rad/D01。该文件则包含了用于控制求解进程及结果输出的各类信息。

求解器将_0000.rad/D00 分解为_0000.rst/R00 文件和_0000.out/L00 文件后，将在_0001.rad/D01 文件（即 Engine File）的控制下，完成求解过程。完成求解后将输出 4 类结果文件，分别是用于重启动分析的_0001.rst/R01 文件、包含了图形历程后处理信息的 A01-Ann 文件、包含时间历程后处理信息的 T01 文件和包含模型求解信息汇总的_0001.out/L01 文件。使用_0001.rad/D01 驱动求解器完成求解的详细过程及结果文件体系的详细信息如图 13-5 所示。

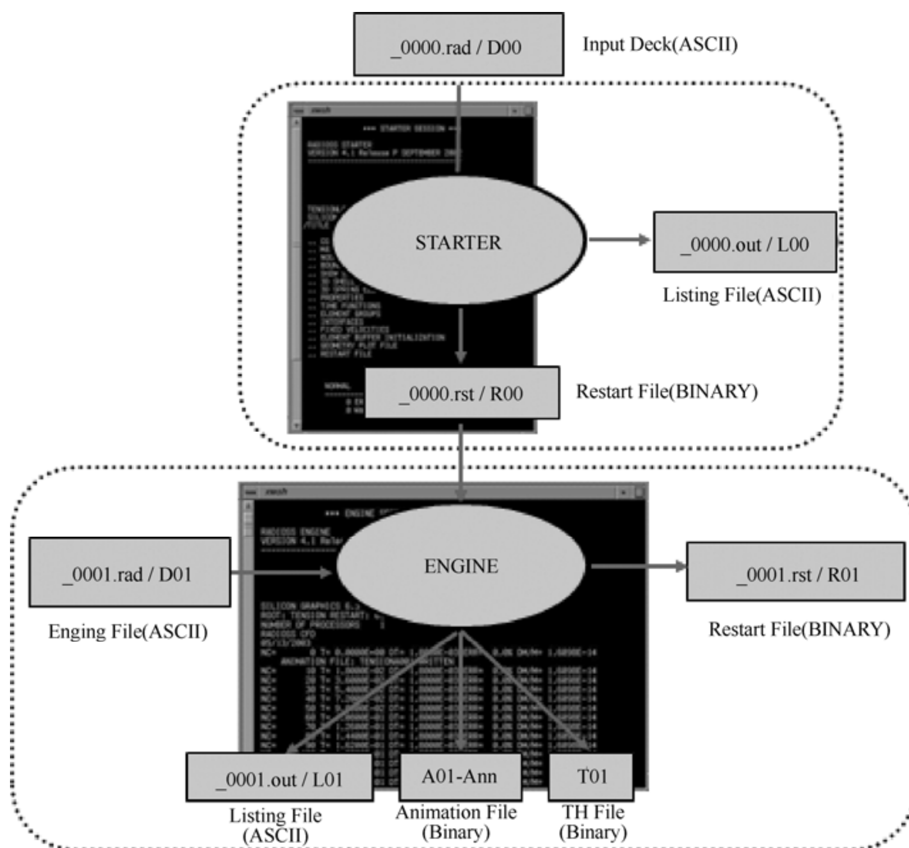


图 13-4　RADIOSS Block 求解器体系结构

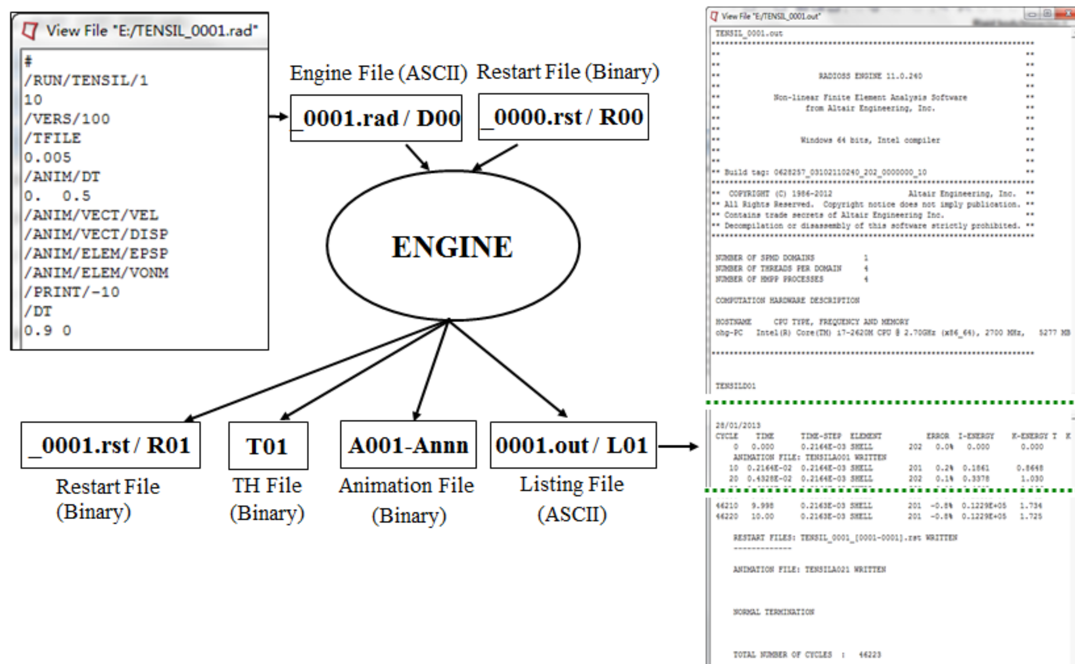


图 13-5　详细过程及详细信息

完成求解后，可以使用 Altair HyperWorks 的图形历程后处理模块 HyperView 对生成的 A00–Ann 文件进行后处理，或使用时间历程后处理文件 HyperGraph 对生成的 T01 文件进行后处理。

RADIOSS Block 的完整文件体系如表 13–1 所示。

表 13–1　RADIOSS Block 的完整文件体系

文　件	描　述	打　开	写　出	格　式
_0000.rad D00（V4）	Input RADIOSS File	Starter/ HyperMesh HyperCrash	HyperMesh HyperCrash	ASCII
_0001.rad D01（V4）	Engine input	Engine	HyperCrash /Text Editor	ASCII
_000n.out L00, Lnn（V4）	List files	Text Editor	Starter/Engine	ASCII
_000n.rst R00, Rnn（V4）	Restart files	Engine	Starter/Engine	Binary （by default）
Annn	Animation files	HyperView	Engine	Binary
Tnn	Time history file	HyperGraph	Engine	Binary （by default）

13.4　RADIOSS 输入文件

RADIOSS Block 的 Starter 文件与经典的显式求解器求解文件组织结构类似，其中包括 Mid、Pid、Part 和 Subset 等几个重要概念。

其中，Mid 和 Pid 分别代表了求解文件中材料模型和单元类型的标识编号。Part 则代表模型中所有具有相同材料类型和单元类型的单元的集合。Part 是 RADIOSS Block 求解器中最重要的概念，每一个 Part 需要对应独有的 Mid 和 Pid。Subset 则代表了一系列 Part 的集合。

使用文本编辑器打开一个典型的 D00 文件，可以发现 D00 文本文件中是以 Block 为单位进行组织的，每一个 Block 分别代表了 D00 文件中的一部分信息，如单元定义、材料模型定义、单元类型定义和接触定义等。

每个 Block 均以反斜杠“/”符号进行引导。在每行内则需要按顺序填入各类关键字及数据。每行为标准的 100 字符，被分为 10 栏。一段典型的 RADIOSS Block 输入文件如图 13–6 所示。

1 Block

```
/RBODY/4773/
RIGID BODY for the RIM
#--1---|---2---|---3---|---4---|---5---|---6---|---7---|---8---|---9---|--10---|
#-RBID |       | nskew | Ispher|   Mass        | grnod | IKREM |  ICOG | Surf  |
    2594              0       0               0       5       0       0       0
#-    Jxx      |          Jyy  |           Jzz |
               0               0               0
#-    Jxy      |          Jyz  |           Jxz |
               0               0               0
#-
```

图 13–6　RADIOSS Block 输入文件

若干个 Block 组织在一起则构成了完整的求解器输入文件。每一个输入文件必须由 Header Card 进行引导，如图 13-7 所示。每一个输入文件必须以关键字/END 结尾。

#RADIOSS	STARTER								
/BEGIN									
ROOTNAME									
100	0								

图 13-7　Header Card 进行引导

在每一个输入文件内部，各个 Block 之间的排列顺序没有具体的要求。例如，图 13-8 所示的 3 种排布方式都是被求解器认可的。

```
1- Header card
2- Materials
3- Nodes
4- Shell elements
5- Properties
6- Interfaces
7- Rigid bodies
8- /END
```

```
1- Header card
2- Rigid bodies
3- Properties
4- Interfaces
5- Materials
6- Shell elements
7- Nodes
8- /END
```

```
1- Header card
2- Materials
3- Nodes
4- Shell elements
5- Materials
6- Properties
7- Nodes
8- Interfaces
9- Rigid bodies
10- Materials
11- /END
```

图 13-8　3 种排布方式

13.5　前处理器 HyperCrash 介绍

Altair 公司与多家一流汽车制造商合作，集成碰撞安全仿真领域的工程经验和最优流程，开发了专用于碰撞安全 CAE 的前处理模块 HyperCrash。它是 HyperWorks 的另一个子模块，完美支持 RADIOSS，能够快速地帮助用户建立碰撞安全分析的模型，其内建的模型检查、材料和模型数据库模块可以大大提高建模效率和减小出错概率。HyperCrash 同时支持 PAM-CRASH2G 和 LS-DYNA 显式求解模型的前处理，并且内嵌了 3 种显式求解模型的转换器，可以高效实现不同显式求解器模型文件之间的转换。

HyperCrash 是一个非常直观和界面友好的前处理程序。它还包括一些实用的安全模块，可以进行假人定位、座椅预变形、安全带生成与缠绕、气囊折叠等，而结果映射模块可以对钣金件进行冲压残余信息的映射。

HyperCrash 提供了大量用于准确创建和管理碰撞安全分析模型的功能：

- 常见装配工艺方法的快速建模功能，如点焊、粘胶、螺栓、缝焊、卷边、卡扣等。
- 先进的工具来检查并修正模型里的交叉和初始穿透。
- 全面的、可定制的碰撞安全模型的全面检查功能，最大限度减少建模错误（见图 13-9）。
- 提供了精确的质量质心计算、管理和调整功能，能够方便地根据指定的总质量和轴荷完成总质量和质心位置的自动调整。
- 使用 HyperCrash 对假人进行定位并进行安全带的生成和缠绕（见图 13-10）。
- 部件及系统模型的库管理功能。
- 导引式高效安全工具包。

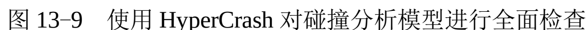


图 13-9　使用 HyperCrash 对碰撞分析模型进行全面检查



图 13-10　使用 HyperCrash 对假人进行定位并进行安全带的生成和缠绕

13.6　本章小结

本章介绍了 RADIOSS 的历史进程，RADIOSS Block 的使用领域和功能，求解输入文件和生成文件的格式，并简要介绍了 HyperCrash 前处理模块。

第 14 章



显式非线性基本理论

本章介绍显式非线性有限元一般理论和 RADIOSS Block 时间步长控制方法。RADIOSS Block 对非线性动力学运动方程的求解采用中心差分法。该算法具有二阶精度，在求解有限元控制方程时，只需在各个时刻点上直接进行计算，不必在时间步长内迭代。这些特点使得中心差分算法非常适合求解高度不连续问题（如接触和失效问题）。同时，显式算法采用一次一个单元的方式扩展结果，因此该方法最适应于应力波影响为主以及碰撞冲击等方面问题的求解。在数学中，中心差分算法是有条件稳定的，即时间积分步长不能大于系统的临界步长。大多数情况下，对于具体的 RADIOSS Block 模型，用户不需要指定或干预模型的积分时间步长。为了求解的稳定性和效率，通常对模型求解的积分时间步长进行有条件的控制，如设置缩放因子以及强制时间步长等。本章将用一个实例来比较不同的时间步长控制方法对计算效率和结果精度带来的影响，同时还给出了时间步长缩放因子设置的一般建议。

本章重点知识

14.1　非线性动力学基本理论

14.2　中心差分算法的稳定条件

14.3　RADIOSS Block 时间步长控制

14.4　RADIOSS Block 时间步长控制实例

14.5　本章小结

14.1 非线性动力学基本理论

14.1.1 有限元控制方程的显式积分算法

采用 U.L.格式，利用虚功原理建立的非线性动力学有限元控制方程为

$$M\ddot{x}+C\dot{x}+Kx=F_{ext}+f_c \tag{14-1}$$

式中，M 为质量矩阵。

$$M=[M]=\sum_e M_e=\sum_e^n\int_{\upsilon_e}\rho[N]^{\mathrm{T}}[N]\mathrm{d}\upsilon \tag{14-2}$$

n 为单元总数，$[N]$ 为插值矩阵（形函数矩阵）。

C 为阻尼矩阵。

$$C=[C]=\sum_e C_e=\sum_e^n\int_{\upsilon_e}c[N]^{\mathrm{T}}[N]\mathrm{d}\upsilon \tag{14-3}$$

K 为总体刚度矩阵。

$$K=[K]=\sum_e K_e=\sum_e^n\int_{\upsilon_e}[B]^{\mathrm{T}}[D^{ep}][B]\mathrm{d}\upsilon \tag{14-4}$$

F_{ext} 为外力矢量。

$$F_{ext}=[F_{ext}]=\sum_e^n\left(\int_{\upsilon_e}\rho[N]^{\mathrm{T}}f\mathrm{d}\upsilon+\int_{\partial b_1}[N]^{\mathrm{T}}\right)t\mathrm{d}s \tag{14-5}$$

f 为单位质量的体力矢量。

$$f=(f_x\quad f_y\quad f_z)^{\mathrm{T}} \tag{14-6}$$

t 为面力矢量。

$$t=(t_x\quad t_y\quad t_z)^{\mathrm{T}} \tag{14-7}$$

f_c 为接触力矢量，是法向接触力和切向摩擦力的合力。

x、$\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 分别为位移矢量、速度矢量和加速度矢量。

$$x=(x_1\quad x_2\quad x_3)^{\mathrm{T}} \tag{14-8}$$

$$\dot{x}=(\dot{x}_1\quad \dot{x}_2\quad \dot{x}_3)^{\mathrm{T}} \tag{14-9}$$

$$\ddot{x}=(\ddot{x}_1\quad \ddot{x}_2\quad \ddot{x}_3)^{\mathrm{T}} \tag{14-10}$$

Kx 代表集总内力矢量，其由全局坐标系中单元节点力矢量和力矩矢量确定。

为简单起见，在式（14−1）中令 $Q=F_{ext}+f_c$，表示包含接触力的外力矢量，则

$$M\ddot{x}+C\dot{x}+Kx=Q \tag{14-11}$$

把总积分时间分成若干步，每步间隔为 Δt_1，Δt_2，…，Δt_{i-1}，Δt_i，Δt_{i+1}，…在某一时刻 t，其前一步和下一步的时刻如图 14−1 所示。

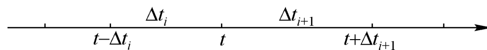


图 14−1　时间积分划分

$$\dot{x}_{t-\Delta t_i/2}=\frac{x_t-x_{t-\Delta t_i}}{\Delta t_i} \tag{14−12}$$

$$\dot{x}_{t+\Delta t_i/2}=\frac{x_{t+\Delta t_{i+1}}-x_t}{\Delta t_{i+1}} \tag{14−13}$$

t 时刻的加速度为

$$\ddot{x}_t=\frac{x_{t+\Delta t_{i+1}}-x_t}{\frac{1}{2}(\Delta t_i+\Delta t_{i+1})\Delta t_{i+1}}-\frac{x_t-x_{t-\Delta t_i}}{\frac{1}{2}(\Delta t_i+\Delta t_{i+1})\Delta t_i} \tag{14−14}$$

如果总积分时间是均匀分隔的，即有 $\Delta t_1=\Delta t_2=\cdots=\Delta t_{i-1}=\Delta t_i=\Delta t_{i+1}=\cdots\ \Delta t$，则得到中心差分算法下的 t 时刻速度和加速度为

$$\dot{x}_t=\frac{1}{2\Delta t}(-x_{t-\Delta t}+x_{t+\Delta t}) \tag{14−15}$$

$$\ddot{x}_t=\frac{1}{\Delta t^2}(x_{t-\Delta t}-2x_t+x_{t+\Delta t}) \tag{14−16}$$

而在 t 时刻的有限元控制方程为

$$M\ddot{x}_t+C\dot{x}_t+Kx_t=Q_t \tag{14−17}$$

将 t 时刻速度和加速度即式（14−15）和式（14−16）代入上式，有

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}M+\frac{1}{2\Delta t}C\right)x_{t+\Delta t}=Q_t-\left(K-\frac{2}{\Delta t^2}M\right)x_t-\left(\frac{1}{\Delta t^2}M-\frac{1}{2\Delta t}C\right)x_{t-\Delta t} \tag{14−18}$$

如果 $x_{t-\Delta t}$ 和 x_t 已经求得，则 $t+\Delta t$ 时刻的位移 $x_{t+\Delta t}$ 可以由上式解出，也即上式是求各个离散时间点处解的积分递推公式。由于在 $t+\Delta t$ 时刻时用的是 t 时刻的控制方程（式 14−17），K 矩阵不出现在上述递推公式的右端，所以这种求解过程被称为显式积分算法。

由上述递推公式可知，中心差分算法有一个起步问题。因为 $t=0$ 时刻，为了计算 $x_{\Delta t}$，除了已知的初始条件 x_0 外，还需要知道 $x_{-\Delta t}$，所以必须要用一个专门的起步方法。事实上，利用式（14−15）和式（14−16），可得

$$x_{-\Delta t}=x_0-\Delta t\dot{x}_0+\frac{\Delta t^2}{2}\ddot{x}_0 \tag{14−19}$$

上式中 $\dot{x}_0$ 可以从给定的初始条件式 $\dot{x}_i=v_i(X_j)$ 得到，而 $\ddot{x}_0$ 则可以利用 $t=0$ 时刻的有限元控制方程（式 14−17）得到。

中心差分算法逐步显式求解有限元控制方程的一般步骤如下：

1．初始计算

（1）形成刚度矩阵 K，质量矩阵 M 和阻尼矩阵 C。

（2）给定 x_0、$\dot{x}_0$ 和 $\ddot{x}_0$。

（3）选择积分时间步长 Δt，$\Delta t < \Delta t_{cr}$，并计算积分常数。

$$c_0 = \frac{1}{\Delta t^2}, \quad c_1 = \frac{1}{2\Delta t}, \quad c_2 = 2c_0, \quad c_3 = \frac{1}{c_2}$$

（4）计算选择积分时间步长 Δt，$\Delta t < \Delta t_{cr}$，并计算积分常数。

$$x_{-\Delta t} = x_0 - \Delta t \dot{x}_0 + c_3 \ddot{x}_0$$

（5）形成等效质量矩阵 $\tilde{M}$：$\tilde{M} = c_0 M + c_1 C$。

（6）三角分解 $\tilde{M}$：$\tilde{M} = LDL^{\mathrm{T}}$。

2．对于每一个积分时间步长

（1）计算时刻 t 的等效载荷 $\tilde{Q}_t = Q_t - (K - c_2 M)x_t - (c_0 M - c_1 C)x_{t-\Delta t}$。

（2）计算时刻 $t+\Delta t$ 的位移 $LDL^{\mathrm{T}} x_{t+\Delta t} = \tilde{Q}_t$。

（3）如果需要，则计算时刻 t 的速度和加速度。

$$\dot{x}_t = c_1(-x_{t-\Delta t} + x_{t+\Delta t})$$
$$\ddot{x}_t = c_0(x_{t-\Delta t} - 2x_t + x_{t+\Delta t})$$

14.1.2 非线性动力学有限元求解流程

基于上述控制方程的求解过程，结合有限元法的基本过程，可将非线性动力学的有限元求解过程概括如图 14−2 所示。

除了下节讨论的中心差分算法的稳定性条件，还有以下两点需要强调：

（1）中心差分算法是显式算法。K 矩阵不出现在递推式（14−18）的左端，当 M 是对角阵，C 可以忽略或也是对角矩阵，利用递推公式求解运动方程时不需要进行矩阵求逆，仅需要进行矩阵乘法运算以获得方程右端的等效载荷，之后可得到唯一的各个分量。显式算法的这个优点在非线性分析中意义突出。因为非线性分析中，每个增量步的刚度矩阵是被修改的，这时采用显式算法可以避免矩阵求逆运算。

（2）中心差分算法比较适用于有冲击、爆炸类型载荷引起的波传播问题的求解是由其算法本质决定的。因为当介质的边界或内部某个小的区域受到初始扰动后，是按一定的波速 c 逐步向介质的内部和周围传播的。如果分析递推式（14−18），将会发现当 M 和 C 是对角矩阵时，即显式算法时，若给定某些节点初始扰动（即 $\dot{x}$ 的某些分量为

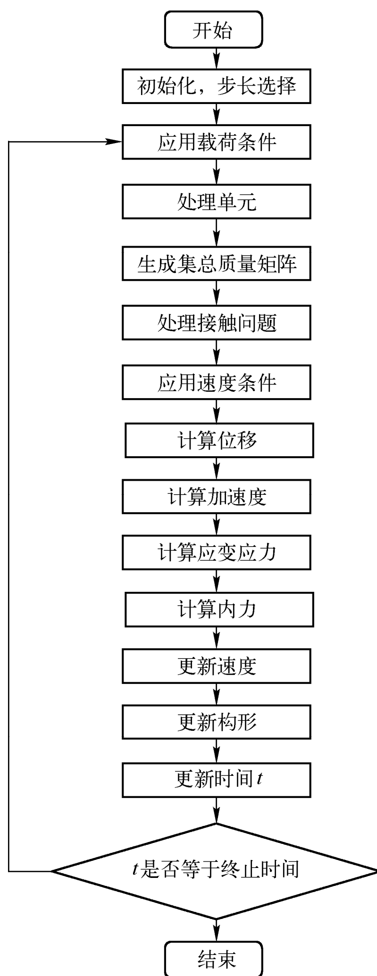


图 14−2　非线性动力学有限元求解流程

非零值），在经过一个时间步长 Δt 后，和它们相关的节点（在 K 中处于同一带宽内的节点）将进入运动，即 $\ddot{x}$ 中和这些节点对应的分量将变成非零项。随着时间的推移，其他节点将依次进入运动。此特点正好和波传递的特点相一致。但从算法方面考虑，为了答案的正确性，每一个时间步长 Δt 中，网格内与新进入计算节点相应的几何区域的扩大应大于波传播范围的扩大（ $c\Delta t$ ），所以时间步长要受到限制，即小于临界步长 Δt_{cr} 。当研究高频成分占重要作用的波传播过程时，为了得到有意义的解，必须采用小的时间步长。这也是和中心差分算法的时间步长需要受到临界步长限制的要求相一致的。

14.2 中心差分算法的稳定条件

数学上，用数值积分方法求解系统运动方程时必须考虑解的稳定性条件。解的稳定性是指如果在任何积分时间步长 Δt 条件下，对于任何初始条件的解不会发生无限制增长的现象，则称此积分算法是无条件稳定的；如果积分时间步长 Δt 必须小于某个临界步长 Δt_{cr} ，上述性质才能保持，则称此积分算法是条件稳定的。

易证明中心差分算法是条件稳定的，其稳定条件为

$$\Delta t \leqslant \Delta t_{cr} = \frac{T_{\min}}{\pi} \tag{14-20}$$

式中， $T_{\min}$ 是有限元系统的最小固有振动周期。

实际上，并不需要求解整个系统的固有特征值问题以得到 $T_{\min}$ ，因为有限元系统的最小固有振动周期 $T_{\min}$ 总是大于或者等于最小尺寸单元的最小固有振动周期 $T_{\min}^{(e)}$ ，其结果总是偏于安全的。

可以证明，有限元系统最小尺寸单元的最小固有振动周期 $T_{\min}^{(e)}$ 为

$$T_{\min}^{(e)} = \frac{l_c}{c}\pi \tag{14-21}$$

式中， l_c 是最小尺寸单元的最小特征长度，将在第 16 章展开该内容；

由连续介质力学可知

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{14-22}$$

式中， E 、 ρ 是材料杨氏模量和质量密度。

这样，中心差分算法解的稳定性条件为

$$\Delta t \leqslant \Delta t_{cr} = l_c \cdot \left(\sqrt{\frac{E}{\rho}}\right)^{-1} \tag{14-23}$$

由此可见，有限元模型中最小尺寸单元将决定中心差分算法的时间步长选择。它的尺寸越小，将使 Δt_{cr} 越小，从而使整个积分步数增多，整个模型求解的计算时间增加。这一点在划分网格模型时一定要注意把握，避免因个别单元尺寸过小而导致计算时间不合理地增加。同时，也不能为了增大 Δt_{cr} 而使单元的尺寸过大，这样将使有限元的解失真。

14.3　RADIOSS Block 时间步长控制

14.3.1　RADIOSS Block 时间步长控制介绍

对于给定的 RADIOSS Block 模型，时间步长的设定与估算通常基于以下两种方法。

（1）单元时间步长，针对模型中的最小单元，必须满足：

$$\Delta t_e < s_f \left(\frac{lc}{c}\right) \tag{14-24}$$

式中，s_f 是时间步长缩放因子，且 $s_f < 1$，用于增强数值稳定性。

通常，该缩放因子默认值 0.9 适用于大部分情况，但是某些特殊情况，需要人为设定一个更小的值。例如，对于如图 14-3 所示类型的材料，式（14-23）可进一步写为

$$\Delta t_e < l_c \cdot \left(\sqrt{\frac{E}{\rho}}\right)^{-1} = l_c \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{1}{e}\right)^{-1} \tag{14-25}$$

可见，对于这种材料，当应变增大时，应力对应变的偏导会增大，从而导致单元稳定的理论临界步长下降。为了保证整个求解过程的稳定性，对计算使用的步长施加一个更小的缩放因子 s_f 是有必要的。

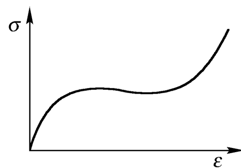


图 14-3　特殊材料泡沫

经验表明，为了避免这种时间离散导致的不稳定性，将缩放因子从默认值 0.9 减小到 0.66 就基本可以了。

另外一种特殊情况是，模型只有一个单元，这种情况下波的传播过程不能够正确解析，RADIOSS 也可能会给出一个比理论临界步长大的积分时间步长。这时候，需要将这个缩放因子减小，一般建议使用 0.1。

关于时间步长缩放因子的使用，概括如下：

1）对于泡沫（Foam），建议使用 0.66。

2）仅有一个单元的模型，使用 0.1。

3）仅有两个有限单元的模型，使用 0.2。

4）多于 3 个有限单元的模型，使用默认值 0.9。

5）不要使用大于 1.0 的值。

（2）对于任意一个节点，需要确保如下关系成立：

$$\Delta t_n < \sqrt{\frac{2m}{k}} \tag{14-26}$$

式中，m 是节点质量，k 是节点等效刚度。

对于规则网格（如正方形壳单元）而言，$\Delta t_e = \Delta t_n$；而对于不规则网格（绝大多数情况是这样），$\Delta t_n > \Delta t_e$，即节点临界步长大于单元临界步长。

无论是单元临界步长还是节点临界步长，在材料给定的情况下，仅与网格划分有关。但是，当模型含有接触（Interface）时，模型稳定计算临界步长还受到接触稳定条件的影响。接触计算的稳定条件所要求的积分时间步长通常都比单元临界步长大很多，一般不用考虑。

但是对于模型装配质量较差的模型，接触计算的稳定条件所要求的积分时间步长有可能比模型的单元临界步长还小，称之为接触（Interface）控制了模型的时间步长。这是模型不稳定的因素之一，需要避免。本书将在第 18 章接触相关章节解释接触计算的稳定条件。

概括地说，无论模型以单元临界步长进行求解，还是以节点临界步长进行求解，接触的稳定性都是必须考虑的。任意时刻，模型通过中心差分递推求解下一时刻状态的稳定的时间增量（步长）是

$$\Delta t \leqslant \mathrm{Min}(\Delta t_i,\ \Delta t_e \,\|\, \Delta t_n) \tag{14-27}$$

14.3.2 RADIOSS Block 时间步长控制卡片

1．节点时间步长控制卡片

在 Engine 文件里，通过如下卡片激活节点时间步长：

```
/DT/NODA
ΔTsca ΔTmin
```

其中，ΔTsca 是临界步长缩放因子，ΔTmin 是求解计算步长。

控制节点时间步长，需要使用如下卡片：

/DT/NODA/STOP ΔTsca ΔTmin	—	如果时间步长下降到ΔTmin，则计算停止
/DT/NODA/CST ΔTsca ΔTmin	—	如果时间步长下降到ΔTmin，在该节点上增加质量，则使得模型保持$\Delta T_{\min}$为时间步长继续计算

如果 Engine 文件里已经包含了/DT/NODA/STOP 或者/DT/NODA/CST 卡片，那么模型就已经激活了节点时间步长，因此不需要额外增加单独的/DT/NODA 卡片。

在添加如上节点时间步长控制卡片的基础上，还可以对接触动态条件施加时间步长控制，比如：

```
/DT/INTER/DEL
ΔTsca ΔTmin
```

该卡片的作用是：如果接触条件的稳定步长变得小于ΔTmin，则把相关的节点从接触条件里删掉。这个卡片通常能够使得“接触控制整体时间步长”的模型继续完成计算，但是由于删掉了某些节点的接触条件，与物理实际不符，整体模型的结果可信度受到损害，需要核查后才能使用，因此对于这个卡片，需要谨慎使用。

2．单元时间步长控制卡片

单元时间步长是默认选项，即如果模型没有指定使用节点时间步长，则 RADIOSS 求解器将默认使用单元时间步长。对于不同的单元类型，可以使用如下卡片来设定各自不同的缩放因子和最小步长：

```
/DT/keyword2
ΔTsca ΔTmin
```

其中 keyword2 可以是各种单元类型，如 Brick、Quad、Shell、Sh3n、Truss、Beam、

Spring 和 Airbag。如果需要指定某一类单元的时间稳定步长降低到ΔTmin 后，则停止模型的计算，可以使用如下卡片：

```
/DT/keyword2/STOP
ΔTsca ΔTmin
```

在某些情况下，需要根据时间步长的变化，将体单元或壳单元切换为小应变算法，这时需要使用如下卡片：

```
/DT/eletype/CST
ΔTsca ΔTmin
```

其中 eletype 是 Brick、Shell 和 Sh3n。

在使用节点时间步长时，除了可以和节点时间步长控制一样使用/DT/INTER/DEL 卡片，还可以对接触条件使用另外一种控制方法：

```
/DT/INTER/CST
ΔTsca ΔTmin
```

这个卡片的功能类似于卡片 /DT/NODA/CST，如果接触条件稳定步长下降到小于Δ*T*min，那么在相关的节点上增加质量以保证接触条件的步长稳定在Δ*T*min。经验显示，不推荐使用卡片/DT/INTER/CST 来维持模型里接触条件的稳定时间步长。通常对于 Type7 类型的接触条件，使其保持恒定的步长就必须对节点增加额外的质量，这样会产生较大的模型总质量误差。

14.4 RADIOSS Block 时间步长控制实例

14.4.1 实例教程——板材拉伸试验模拟

在本节将使用 HyperMesh 来建立一个板材拉伸试验模拟的 RADIOSS Block 模型，在提交求解后，使用 HyperView 查看结果。在按本实例完成标准过程之后，改变 Engine 文件的时间步长控制卡片，重新计算以对比观察时间步长控制卡片对模型求解的影响。

本实例的分析对象是标准的板材拉伸试验试样（见图 14−4）。考虑到模型的对称性，这里采用了 1/4 对称模型（见图 14−5）来进行建模分析。

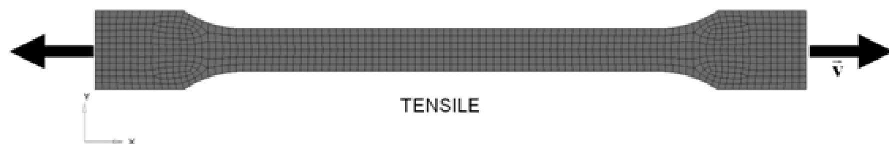


图 14−4　标准板材拉伸试样

模型描述如下。

（1）单位制：基本单位长度为 mm，时间为 ms，质量为 kg，对应的导出单位力为

kN，应力为 GPa。



图 14–5　1/4 对称模型

（2）模拟时间为 10ms。

（3）边界条件：右上角 3 个节点约束 Tx、Ry、Rz，右下角节点约束 Tx、Ty、Rx、Ry、Rz，最下一排节点施加对称约束 Ty、Rx、Rz。

（4）模型左侧施加恒定的 X 向速度 1mm/ms。

（5）试样的材料为 Al 6063 T7，使用如下 Law2 描述应力应变关系，参数如下：

ρ= 2.7e^{-6} kg/mm^3	[Rho_I] 密度
E = 60.4 GPa	[E] 弹性模量
υ= 0.33	[nu] 泊松比
σ_0 = 0.09026 GPa	[a] 屈服应力
K = 0.22313 GPa	[b] 硬化参数
N = 0.374618	[n]硬化指数
σ_{max} = 0.175 GPa	[SIG_max] 最大应力
ε_{max} = 0.75	[EPS_max]失效塑性应变

STEP 01 加载 RADIOSS Block 模板

（1）启动 HyperMesh。

（2）在菜单 Preferences 里选择 User Profiles 或单击按钮。

（3）选择 RADIOSS（Block100）并单击 OK 按钮。

STEP 02 导入网格模型文件

（1）单击 Open Model 或按钮

（2）选择文件 tensile_test.hm，单击 Open 按钮，模型加载到图形区。

STEP 03 定义试样的材料

（1）使用下面方法的一种，进入材料定义面板：

1）在 Model Browser 里单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create→Material。

2）在 Material 下拉菜单里单击 create。

3）在工具栏中单击按钮。

（2）在 Name 文本框中输入 MAT_1。

（3）Type 选择 ELASTO-PLASTIC。

（4）CARD image 选择 M2_PLAS_JOHNS_ZERIL。

（5）单击 Card edit material upon creation 以激活该选项。

（6）单击 Create 以创建材料并编辑材料卡片。

（7）按图 14-6 所示编辑材料卡片。

/MAT/PLAS_JOHNS/ Id 1

MAT_1

[Rho_Initial] 2.700e-06

[E] 60.400 [nu] 0.330

[a] 9.026e-02 [b] 2.231e-01 [n] 3.746e-01 [EPS_max] 0.750

[c] [EPS_0] [ICC] [Fsmooth] [Fcut]

图 14-6　材料卡片

单击 return 返回。

STEP 04 定义试样的属性

（1）使用下面方法的一种，进入属性定义面板：

1）在 Model Browser 里单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create → Property。

2）在 Property 下拉菜单里单击 Create。

3）在工具栏中单击按钮。

（2）在 Name 文本框中输入 sheet_1.7。

（3）Type 选择 SURFACE。

（4）CARD image 选择 P1_SHELL。

（5）单击 Create 以创建材料并编辑材料卡片。

（6）按图 14-7 编辑性卡片。

/PROP/SHELL/ Id 1

sheet_1.7

[Ishell] [Ismstr] [Ish3]

[Hm] [Hf] [Hr] [Dm]

[N] [Istrain] [Thick] 1.700 [Ashear] 8.333e-01 [Ithick]

图 14-7　属性卡片

单击 Return 按钮返回。

STEP 05 更新试样的材料与属性

（1）在 Model Browser 里选择 Tensile specimen 部件，单击鼠标右键。

（2）单击图标，并选择 Assign 面板。

（3）在 Property 里选择 sheet_1.7。

（4）在 Material 里选择 MAT_1。

（5）单击 Apply。

STEP 06 创建边界条件

（1）在 Utility 浏览器里打开 BC's Manager，或者从下拉菜单里选择 Tools → BCs Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 constraint1，设置 Select type 为 Boundary Condition，并设置 GRNOD 为 Nodes，如图 14-8 所示。

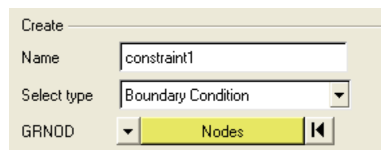


图 14-8　创建 constraint1

（3）单击 Nodes 弹出节点选择界面，选择如图 14-9 所示右上角的 3 个节点，并单击 proceed。



图 14-9　选择 3 个节点

（4）选中 Tx、Ry 和 Rz 复选框，如图 14-10 所示。

（5）单击 create，完成创建约束 constraint1。

（6）重复上述步骤，对如图 14-11 所示的节点，约束 Tx、Ty、Rx、Ry 和 Rz，创建约束条件 constraint2。

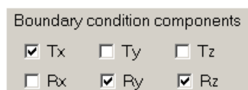


图 14-10　约束自由度



图 14-11　选择右下角节点

（7）重复上述步骤，对如图 14-12 所示的节点，约束 Ty、Rx 和 Rz，创建约束条件 constraint3。



图 14-12　选择最下排节点

STEP 07 施加强制拉伸速度

（1）在 Utility 浏览器里打开 BC's Manager，或者从下拉菜单里选择 Tools → BCs Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 velocity，设置 Select type 为 imposed velocity ，并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）单击 Nodes，在弹出的节点选择面板里选择如 14–13 所示的左侧节点。



图 14–13　选择左侧节点

（4）选择方向为 X，并设置 Y sacle 为–1.0。

（5）单击 Create/Seleect curve ID 按钮，弹出编辑器 XY curve editor。

（6）创建一条新的 curve，设置 Name 为 Load，其值如 14–14 所示。

（7）关闭 XY curve editor，创建的 Curve 被引用。

（8）单击速度条件创建面板最下部的 Create 按钮，完成强制速度的施加。

X	Y
0	1
1e+30	1

图 14–14　速度曲线

STEP 08 定义输出

（1）在 Utility 菜单中单击 Engine File。

（2）在弹出的 RADIOSS Engine File Tool 窗口中选择 GENERAl 选项卡，设置如图 14–15 所示的值后，单击 Apply。

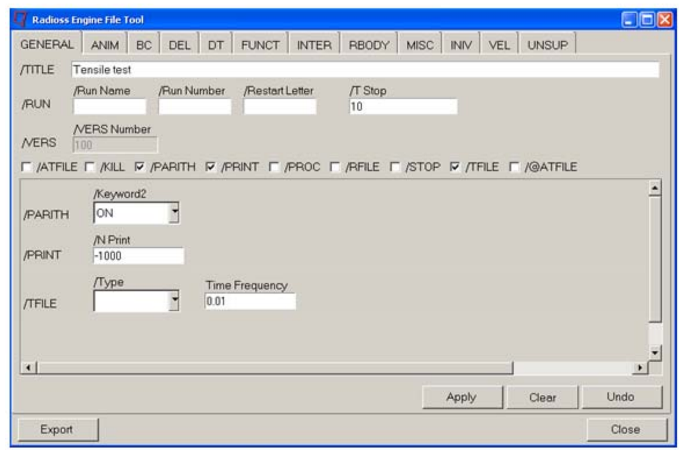


图 14–15　GENERAL 选项卡

选择 ANIM 选项卡，设置如图 14–16 所示的值后，单击 Apply，单击 Close。

STEP 09 导出模型并提交求解

（1）在 File 下拉菜单里单击 Export 或者单击按钮（对于 HyperWorks Desktop 是按钮），单击按钮（对于 HyperWorks Desktop 是按钮）选择模型求解的本地路径，如

图 14–17 所示。

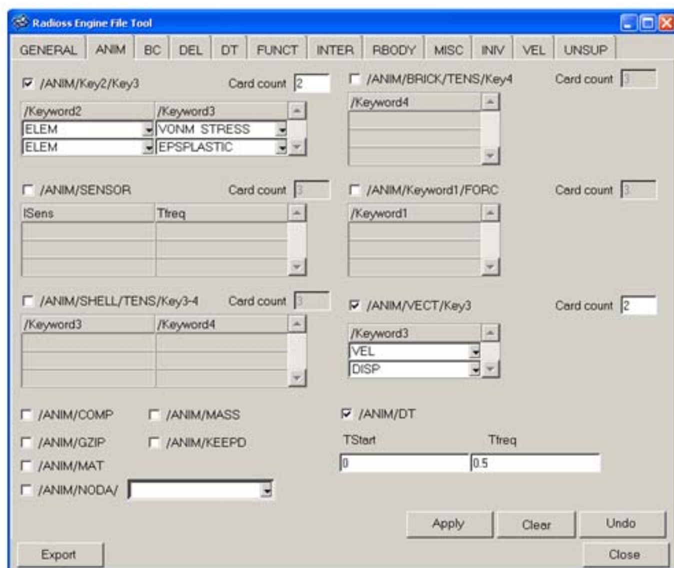


图 14–16　ANIM 选项卡

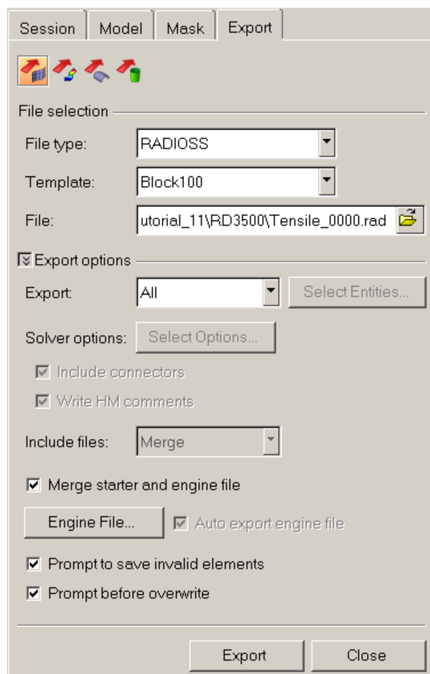


图 14–17　导出模型

（2）输入模型名称 TENSIL，并单击 Save。单击下拉按钮显示出 Export options，确认没有选中 Merge starter and engine file 后，单击 Export → Close。

（3）打开 RADIOSS Manager，在 Input file（s）栏选择刚刚导出的模型，在 Options 文

本框中输入−both，单击 Run 来提交求解，如 14−18 所示。

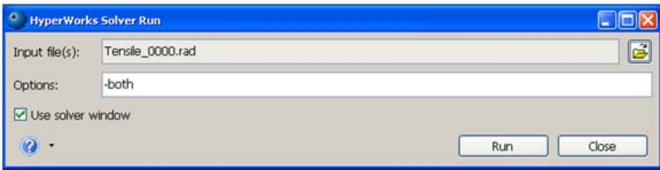


图 14−18　提交求解

STEP 10 查看结果

（1）打开_0000.out 文件，查看模型是否有 error，如果没有则表示模型正常求解完成。

（2）打开 HyperView 查看位移云图和塑性应变云图，如图 14−19 所示。

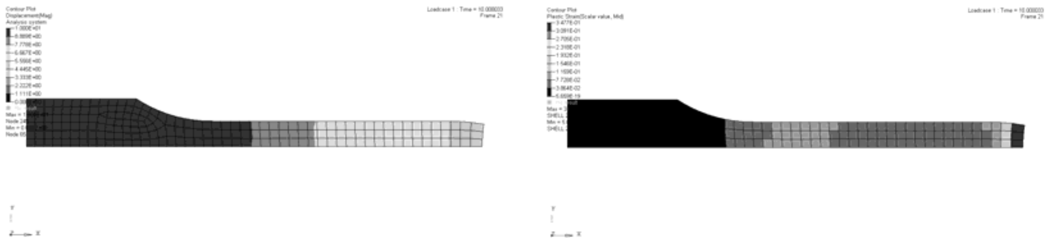


图 14−19　结果云图

14.4.2 不同时间步长控制的对比

在模型计算完成后，打开 TENSILE_0001.out 文件，查阅模型求解的时间步长是 2.164E−4。由于本模型没有设置时间步长控制卡片，即 RADIOSS 求解器是以默认的单元临界步长来求解的，也就是说该模型的单元时间步长为 2.164E−4。在该 out 文件的末尾，看到 RADIOSS 求解器记录了整个问题的求解使用的积分次数（Cycles)为 55467。

将 TENSILE_0000.rad 打开，在 Engine 数据块里加入如下时间步长控制卡片：

```
/DT/NODA
0.9       0
```

保存并求解完成后，可以看到模型求解的时间步长变为 2.2521E−4，积分次数减少为 53291。上述添加的卡片激活了节点时间步长，即 2.2521E−4 是模型的节点时间步长。

再将上述增加的时间步长卡片改为

```
/DT/NODA
0.9       3E−4
```

并再次完成求解，可以看到模型求解的时间步长是固定值 3E−4，而且_0001.out 文件提示模型在求解完成时质量增加误差是 2.19%，而积分循环次数则减少为 40001。

为了稳定更快地（使用更大的求解时间步长）完成求解，采取强制的恒定节点时间步长（带来质量增加）是实际应用中经常使用的，即质量缩放技术。正如本例显示的那样，这种方法带来的负面结果是导致模型系统质量的非物理增加。而质量的增加意味着物理本质的改变和仿真结果可信度的降低。因此，实际使用时通常要求控制质量增加误差的百分比，一般控制在 2%～5%为宜。

RADIOSS 求解器从 9.0 版本开始，集成了一种高级质量缩放技术（Advanced Mass Scaling，AMS），突破了经典的质量缩放技术的瓶颈：能够在不增加或者很少增加模型质量的条件下使用更大的时间步长完成显式模型的求解。

14.5　本章小结

本章介绍了非线性动力学分析的基本理论，包括显式积分算法、非线性动力学有限元求解流程和中心差分算法的数值稳定条件。结合 RADIOSS 求解器介绍了 RADIOSS Block 里时间步长的控制方法和相关卡片。本章的实例还示范了使用 HyperMesh 进行 RADIOSS Block 建模的完整过程。

第 15 章

常用单元类型



对于一个三维的实体，基于其 3 个尺寸长 L、宽 b、厚度 t 及其曲率半径 R，工程中使用如下基本假设进行分析。

- 如果 $L/t > 20$ 并且 $R/t > 20$：满足薄板壳 Thin Shell 假设（Kirchhoff 或 Mindlin 理论）。
- 如果 $10 < L/t < 20$ 并且 $10 < R/t < 20$：可使用厚板壳 Thick Shell 假设（Mindlin 理论）。
- 如果 $4 < L/t < 10$ 并且 $4 < R/t < 1$：使用 Thick Shell 单元。
- 如果 $L/t < 4$ 或者 $R/t < 4$：使用块体 Solid 单元。

本章重点知识

15.1　1D 单元

15.2　2D 单元

15.3　3D 单元

15.4　RADIOSS Block 单元公式应用实例

15.5　本章小结

其中，板壳使用 2D 的中面网格，厚板壳使用基于正应力恒定假设的 3D 网格，实体则使用不带正应力恒定假设的 3D 网格。

对于上述某一类给定的单元，RADIOSS Block 还可以包含以下各种单元公式选项：

- 积分点数。
- 应力更新方式。
- 大应变或小应变假设。
- 缩颈后的塑性选项及材料模型集成。
- 单元类型和沙漏公式。

本章将介绍 RADIOSS Block 中常用的各种单元类型：1D 的杆单元（Truss）、梁单元（Beam）和弹簧单元（Spring），2D 的板壳单元（Shell），3D 的厚板壳单元（Thick Shell）和实体单元（Solid）。由于 Spring 单元在系统级模型装配和连接中应用非常广泛（Spring Type 13 应用最多），本章对主要的最常用几类单元都做了详细讲解。最后通过几个实例教程来学习 RADIOSS Block 的建模过程，并讲解各主要单元算法选项对计算精度和效率的影响。

15.1　1D 单元

15.1.1　杆单元（Truss）

标准的 Truss 单元是标准的二节点单元，对应的属性是/PROP/TRUSS 或/PROP/TYPE2，只能与线弹性材料模型（/MAT/LAW1）和弹塑性 Johnson−cook 材料模型（/MAT/ LAW2）匹配使用，如图 15−1 所示。



图 15−1　Truss 单元

Truss 单元特征长度 l_c 就是单元的长度，因此其临界时间步长为

$$\Delta t = \frac{L(t)}{c} \tag{15−1}$$

式中，$L(t)$ 是 Truss 单元的当前长度。

由于单个的 Truss 单元仅能承受轴向载荷，不能承受剪切、弯曲和扭转，因此，串接的 Truss 单元可以模拟绳索。另外，RADIOSS Block 的 Truss 单元可以设置压缩初始间隙。

Truss 的属性卡片格式如表 15−1 所示。

表 15−1　Truss 的属性卡片

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
/PROP/TYPE2/prop_ID/unit_ID or /PROP/TRUSS/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
Area		Gap_{ini}							

各个参数解释如表 15−2 所示。

表 15-2　Truss 的属性参数说明

数据域	内容
prop_ID	Property ID，整数，最大为 10 位
unit_ID	可选单位系统 ID，整数，最大为 10 位
prop_title	Property 标题，字符，最大为 100 位
Area	初始横截面面积，实数
Gap_{ini}	初始间隙，默认是 0，实数

（1）如果 Truss 单元的材料参数里泊松比不为 0，则任意时刻 Truss 单元的截面面积按式（15-2）更新。

$$Aera_t = \frac{Area_{t-dt}}{(1+\nu\dot{\varepsilon}_x dt)^2} \tag{15-2}$$

（2）如果 Truss 单元初始间隙（Gap_{ini}）不是 0，则该 Truss 单元在受压时将有一个空行程，空行程的长度等 Gap_{ini}。

（3）对于 Gap_{ini} 参数，如果不是默认值 0，那么当该值为正数，在 Truss 受压缩时，初始间隙有效，即在其受压的初始行程范围为 0～Gap_{ini}，Truss 单元不传递任何载荷。而 Truss 受拉伸载荷时，该初始间隙无效。

15.1.2　梁单元（Beam）

RADIOSS Block 里有两类 Beam 单元，分别是欧拉-伯努力梁（Euler-Bernouilli）和基于铁摩辛柯（Timoshenko）理论的积分梁，分别对应/PROP/BEAM 或/PROP/TYPE3，和/PROP/ INT_BEAM 或/PROP/TYPE18，我们将其分别记为 Beam 和 Int_Beam。

1．经典梁（Beam）

Beam 只能与线弹性材料模型（/MAT/LAW1）和弹塑性 Johnson-cook 材料模型（/MAT/LAW2）匹配使用。Beam 的定义需要 3 个节点，其中 *N*3 用于描述或确定梁截面在空间的方向，即按右手定 *N*1-*N*2-*N*3 所确定的方向是梁截面高度方向（Beam 的自身 *Z* 向）。因此，在建立 Beam 单元时，*N*3 不能与 *N*1-*N*2 共线。

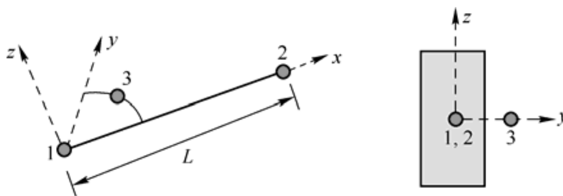


图 15-2　Beam 单元的定义

Beam 单元的特征长度计算较为复杂，如式（15-3）所示：

$$lc = L(b)\cdot 0.5\sqrt{\mathrm{Min}(4, 1+B/12, B/3)} \tag{15-3}$$

其中，$L(b)$ 是 Beam 单元的当前长度。

$$B = AL(b)^2 / \mathrm{Max}(Iy, Iz) \tag{15-4}$$

A 是截面面积，Iy 和 Iz 分别是自身 Y 向和 Z 向的截面惯性矩。

Beam 的属性卡片格式如表 15–3 所示。

表 15–3　Beam 的属性卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/PROP/TYPE3/prop_ID/unit_ID or /PROP/BEAM/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
	I_{smstr}								
d_m		d_f							
Area		I_{YY}		I_{ZZ}		I_{XX}			
ω_{DOF}	I_{shear}								

各个参数解释如表 15–4 所示。

表 15–4　Beam 的属性参数说明

数　据　域	内　　容
prop_ID	Property ID，整数，最大为 10 位
unit_ID	可选单位系统 ID，整数，最大为 10 位
prop_title	Property 标题，字符，最大为 100 位
I_{smstr}	小应变开关，整数 = 0：默认设为 4 = 1：从 $t = 0$ 开始使用小应变 = 2：设为 4 = 3：设为 4 = 4：完全几何非线性
d_m	Beam 膜阻尼，默认为 0.00，实数
d_f	Beam 弯曲阻尼，默认为 0.00，实数
Area	横截面积，实数
I_{YY}	弯曲惯性矩，实数
I_{ZZ}	弯曲惯性矩，实数
I_{XX}	扭转惯性矩，实数
ω_{DOF}	节点 $N1$ 和 $N2$ 释放转动自由度标记，6 位布尔数值
I_{shear}	Beam 公式选项，整数 = 0：考虑剪切 = 1：忽略剪切

（1）如果 $I_{\mathrm{smstr}} = 1$，则小应变从 $t = 0$ 时刻开始激活。这将使得 Beam 的分析加快，因为此时其临界步长是恒定的，但是小应变算法将使得 Beam 的精度不能严格保证。

（2）如果 $I_{\mathrm{smstr}} = 1$，给定材料的应力应变数据是工程应力应变数据。否则，它们应该是真实应力应变数据。

（3）输入的参数用于确定 3 个截面惯性矩和截面积。为了保证精确性和稳定性，不建议输入

无真实物理意义的参数，相关参数应满足如图 15−3 所示的基本关系。

$$L > \sqrt{A}$$
$$0.01A^2 < I_y < 100A^2$$
$$0.01A^2 < I_z < 100A^2$$
$$0.1(I_y + I_z) < I_x < 10(I_y + I_z)$$

图 15−3　Beam 参数关系

2．积分梁（Int_Beam）

Int_Beam 是基于铁摩辛柯（Timoshenko）理论的积分梁，考虑横向剪切应变，但是不考虑扭转翘曲刚度，适用于截面大长高比（短梁）的情况。除了线弹性材料模型（/MAT/LAW1）和弹塑性 Johnson−cook 材料模型（/MAT/LAW2），Int_Beam 还能与弹塑性分段线性材料模型（/MAT/LAW36）匹配使用。

Int_Beam 的属性卡片格式如表 15−5 所示。

表 15−5　Int_Beam 的属性卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/PROP/TYPE18/prop_ID/unit_ID or /PROP/INT_BEAM/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
	I_{smstr}								
d_m		d_f							
Nip	I_{ref}	Y_0		Z_0					
Y_i		Z_i		Area					
ωω DOF									

各个参数解释如表 15−6 所示。

表 15−6　Int_Beam 的属性参数说明

数　据　域	内　　容
prop_ID	Property ID，整数，最大为 10 位
unit_ID	可选单位系统 ID，整数，最大为 10 位
prop_title	Property 标题，字符，最大为 100 位
I_{smstr}	小应变开关，整数 = 0：默认设为 4 = 1：从 $t = 0$ 开始使用小应变 = 2：设为 4 = 3：设为 4 = 4：完全几何非线性
d_m	Beam 膜阻尼，默认为 0.00，实数
d_f	Beam 弯曲阻尼，默认为 0.00，实数
Nip	积分点数，整数
I_{ref}	截面参考选项，默认为 0，实数 = 0：截面中心在积分点的合成质心 = 1：截面中心在自定义的局部坐标（Y_0, Z_0）
Y_0	自定义截面中心的 Y 坐标，实数
Z_0	自定义截面中心的 Z 坐标，实数
Y_i	积分点的局部 Y 坐标，整数

（续）

数 据 域	内 容
Z_i	积分点的局部 Z 坐标，整数
Area	积分点的面积，整数
$\omega\omega_{\text{DOF}}$	节点 $N1$ 和 $N2$ 释放转动自由度标记，6 位布尔数值

（1）如果 $I_{\text{smstr}}=1$，则小应变从 $t=0$ 时刻开始激活。这将使得 Beam 的分析加快，因为此时其临界步长是恒定的，但是小应变算法将使得 Beam 的精度不能严格保证。

（2）如果 $I_{\text{smstr}}=1$，给定材料的应力应变数据是工程应力应变数据。否则，它们应该是实应力应变数据。

（3）横截面最多可以定义 100 个积分点，如图 15−4 所示，截面单元的属性，如惯性矩和面积，按式（15−5）计算：

$$
\begin{aligned}
A &= \sum A_i = \sum (\mathrm{d}y_i \mathrm{d}z_i) \\
Iz &= \sum A_i (y_i^2 + 1/12\mathrm{d}y_i^2) \\
Iy &= \sum A_i (z_i^2 + 1/12\mathrm{d}z_i^2)
\end{aligned}
\tag{15-5}
$$

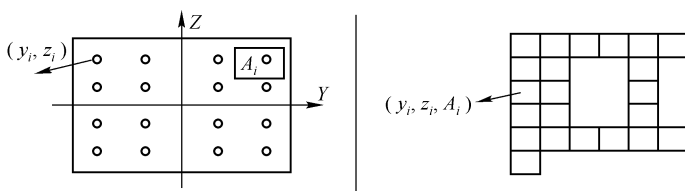


图 15−4　Int_Beam 的截面

积分梁通常用于模拟高横截面长高比（短梁）情况，使用多个积分点以允许在每个积分点处考虑基于 von Mises 准则的弹塑性。但是由于在长度方向仅有一个积分点，不推荐对框架结构的每根线上仅使用一个 Int_Beam 来考虑长度上的塑性过程，在截面高度方向也是这样。

15.1.3 弹簧单元（Spring）

RADIOSS Block 里有很丰富的弹簧（Spring）单元，本节将介绍最常用的 4 类 Spring 单元。

1．Spring Type 4

经典的 Spring 单元是两个节点仅有一个自由度的 Spring，在 RADIOSS 里对应的属性卡片为/PROP/SPRING 或/PROP/TYPE4，因此我们将其称为 Spring Type 4。

Spring Type 4 是简单的物理弹簧及阻尼器，其时间步长依赖于弹簧的质量、刚度和阻尼，如图 15−5 所示。如果它用于连接两个部件，其振动周期增大，默认的时间步长将用于保证积分步长的稳定性和精度。

Spring Type 4 有一个自由度，仅能承受轴向拉压载荷，无论两个节点的位置如何变化，载荷总是沿两节点连线方向，值的大小为

$$F = k\mathrm{x} + c\dot{\mathrm{x}} \tag{15-6}$$

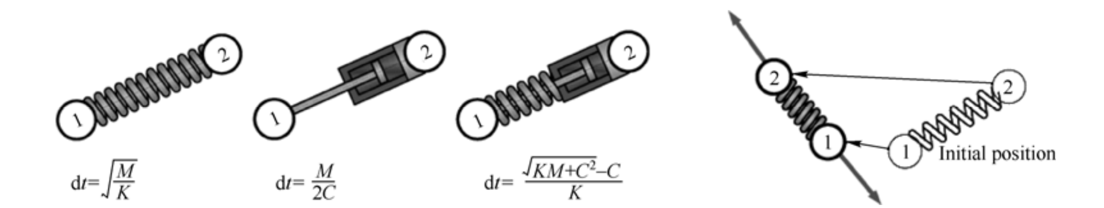


图 15–5　Spring Type4

Spring Type 4 在承受压缩载荷时，其长度可能被压缩到 0，此时其内力的方向是任意的。这种情况会导致不稳定发生，建模时应该避免。

Spring Type 4 的属性卡片格式如表 15–7 所示。

表 15–7　Spring Type 4 的属性卡片

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
/PROP/TYPE4/prop_ID/unit_ID or /PROP/SPRING/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
Mass					sens_ID	I_{sflag}	I_{leng}		
K		C		A		B		D	
fct_ID_1	H	fct_ID_2	fct_ID_3			δ_{min}		δ_{max}	
$Fscale_1$		E		$Ascale_x$					

各个参数的解释如表 15–8 所示。

表 15–8　Spring Type 4 的属性参数说明

数　据　域	内　　容
prop_ID	Property ID，整数，最大为 10 位
unit_ID	可选单位系统 ID，整数，最大为 10 位
prop_title	Property 标题，字符，最大为 100 位
Mass	质量，实数，单个 Spring 的质量或单位长度的质量，依赖于标识 I_{leng}
sens_ID	Sensor ID
I_{sflag}	Sensor 标识，整数 =0：spring 单元激活 =1：spring 单元不激活 =2：spring 单元是否激活依赖于传感器
I_{leng}	输入参数的标识，整数 = 0：每个 Spring 单元 = 1：单位长度 Spring 单元
K	对于线性 Spring：刚度或者刚度*L_0，取决于 I_{leng} 标识，实数 对于弹塑性 Spring：卸载刚度或者卸载刚度*L_0，取决于 I_{leng} 标识，实数
C	拉伸阻尼或者拉伸阻尼*L_0，取决于 I_{leng} 标识，实数
A	拉伸修正系数，实数，默认为 1

（续）

数　据　域	内　　容
B	拉伸修正系数，实数，默认为 1
D	拉伸修正系数，实数，默认为 1
fct_ID$_1$	曲线 ID，定义 f(δ) or f(ε)，取决于标识 I_{leng}，实数 = 0：线性弹簧
H	硬化标识，整数 = 0：非线性弹性弹簧 = 1：弹塑性各向同性硬化 = 2：弹塑性，拉伸与压缩非耦合硬化 = 4：kinematic 硬化 = 5：弹塑性非线性卸载
fct_ID$_2$	曲线 ID，定义 g($\dot{\delta}$) o 或 g($\dot{\varepsilon}$)，取决于标识 I_{leng}，实数 = 0：g($\dot{\delta}$)或 g($\dot{\varepsilon}$) = 0
fct_ID$_3$	整数 如果硬化标识 H =4：曲线 ID 定义(δ) o 或 f$_3$(ε)，取决于标识 I_{leng} 如果硬化标识 H = 5：曲线 ID 定义残余位移与最大位移（或者残余位移*L_0）与最大位移（或者最大位移*L_0）的关系，取决于标识 I_{leng}
δ_{min}	负的失效位移或者负的失效位移*L_0，取决于标识 I_{leng}，默认−10^{30}，实数
δ_{max}	正的失效位移或者正的失效位移*L_0，取决于标识 I_{leng}，默认 10^{30}，实数
Fscale$_1$	$\dot{\delta}$ 或者 $\dot{\varepsilon}$ 的缩放因子（g 函数的横坐标），实数
E	$\dot{\delta}$ 或者 $\dot{\varepsilon}$ 的系数，实数
Ascale$_x$	δ 或者 ε 的系数（f 函数的横坐标），实数

（1）$\delta = l - l_0$，是 Spring Type 4 的长度变化量：当前长度减去初始建模长度。

（2）如果 sens_ID≠0 并且 $I_{sflag} = 0$，那么 Spring 单元将由 sens_ID 激活。

（3）如果 sens_ID≠0 并且 $I_{sflag} = 1$，那么 Spring 单元将由 sens_ID 不激活。

（4）如果 sens_ID≠0 并且 $I_{sflag} = 2$，那么存在以下情况：

1）Spring 的激活与否由 sens_ID 决定，如果该传感器是状态 ON，则 Spring 激活（状态为 ON)；如果该传感器状态是 OFF，Spring 不激活（状态是 OFF）。

2）传感器激活的极限长度是 Spring 的参考长度 L_0，即长度为监测量的传感器的定义时，其最大长度不能超过该 Spring 的参考长度 L_0。

（5）如果使用 Sensor 来控制 Spring 的激活状态，那么 Sensor 作动时弹簧的长度等于 0 时刻弹簧两个节点之间的距离，除了 $I_{sflag} = 2$ 的情况。

（6）如果 $I_{leng} = 0$，那么弹簧的力如下计算：

对于线性弹簧：$F = K\delta + C\dot{\delta}$。

对于非线性弹簧：

$$F = f\left(\frac{\delta}{Ascale_x}\right)\cdot\left[A + B\ln\left|\frac{\dot{\delta}}{D}\right| + Eg\left(\frac{\dot{\delta}}{F}\right)\right] + C\dot{\delta}，其中 -l_0 < \delta < \infty。$$

（7）如果 $I_{leng} = 1$，那么所有的输入按单位长度考虑：Spring 的质量 = Mass*L_0，Spring 的刚度 = K/L_0，Spring 的阻尼 = C/L_0，Spring 的惯量 = $I*L_0$，L_0 是 Spring 的参考长度。同时，力曲线需要按工程应变和工程应变率输入，应变失效准则按应变输入。

输入负的失效长度 = $\delta_{\min}/L_0$，正的失效长度也是这样。

弹簧的力按如下计算：

对于线性弹簧：$F = K\varepsilon + C\dot{\varepsilon}$。

对于非线性弹簧：

$$F = f\left(\frac{\varepsilon}{Ascale_x}\right)\cdot\left[A + B\ln\left|\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right| + Eg\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{F}\right)\right] + C\dot{\varepsilon}$$，其中 $\varepsilon = \delta / l_0$。

（8）对于 $H > 0$ 的情况，$fct_ID_1 = 0$，函数 f 将认为是常数 1。

（9）如果 $\delta_{\min}$（或 $\delta_{\max}$）是 0，那么在负方向（或正方向）上无失效。

（10）如果硬化标识 $H = 4$，如果上屈服曲线和下屈服曲线一样，则 kinematic 硬化。

（11）如果硬化标识 $H = 5$，残余变形是最大位移的函数：$\delta_{resid} = f_{N3}(\delta\max)$。

2．Spring Type 8

Spring Type 8 是具有 6 个自由度的弹簧单元，对应属性卡片/PROP/SPR_GENE 或/PROP/TYPE8。其 6 个自由度相互独立，并各自有相应的刚度属性。Spring Type 8 单元的临界时间步长为 $\mathrm{d}t = \mathrm{Min}(\sqrt{M/K}, \sqrt{I/K_\theta})$，其中，$I$ 是转动惯量，K_θ 是相应的转动刚度。由此不难发现，Spring Type 8 单元的临界步长由广义质量与相应刚度之比最小的自由度确定。

Spring Type 8 的局部坐标系与其节点的位置无关，如果该类型的 Spring 单元没有指定局部坐标系（随动的或固定的），那么其局部坐标系将默认与系统全局坐标系一致。

Spring Type 8 满足全局力平衡条件，但是不能满足全局力矩平衡条件。一般仅推荐在被连接的一个节点是完全固定的情况，或者被连接的两个节点是完全位置重合的情况下，使用这种单元。如果被连接的两个节点位置完全重合，该 Spring Type 8 单元的平动刚度需要足够大，以保证仿真中两个节点保持足够的重合。在这种情况下，全局力矩平衡能够得到保证。

对于非零长度的 Spring Type 8 能观察到在仿真中由于刚体运动而产生的能量误差。因此，在使用非零长度的 Spring Type 8 时需要注意。

Spring Type 8 通常用来连接两个部件，例如汽车转向系统的球销接头。这时，它的平动刚度应该足够大以阻止连接的分离，而转动刚度值很小（甚至是 0）以放开相对转动。下面就是一个示例，来模拟这种球铰连接，实际使用时平动刚度值应根据实际的单位制调整，如图 15-6 所示。

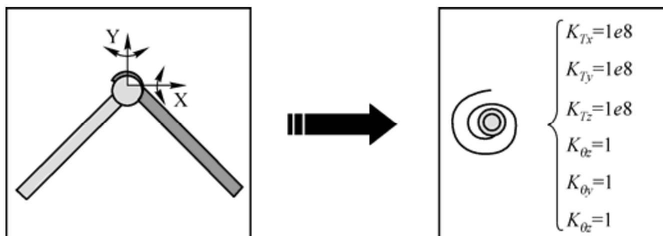


图 15-6　使用 Spring Type 8 模拟铰接

3．Spring Type 13

Spring Type 13 是具有 12 个自由度的弹簧单元，对应属性卡片为/PROP/SPR_BEAM 或/PROP/TYPE13，因为它的功能类似于 Beam，因此又经常被称为 Beam Type Spring。它具有

6 种相互独立的变形模式：轴向拉压、扭转、弯曲（2 个）和剪切（2 个），如图 15−7 所示。

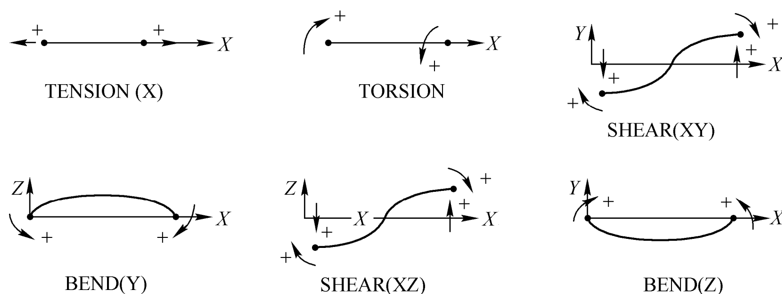


图 15−7　Spring Type 13 的变形模式

与 Beam 单元不同的是，Spring Type 13 的位移（转角）和力（力矩）的产生不是通过几何性质（如截面积、长度、惯性矩）和材料性质（如杨氏模量、剪切模量）得到的。事实上，它同 Beam Type 8 一样，也是由用户自定义的刚度公式决定的。

Spring Type 13 要求单元长度非零。节点 *N*1 和 *N*2 始终用于决定单元的局部坐标系的 *X* 方向，其局部坐标系的 *Y* 方向在 0 时刻确定后，会随着每个积分循环后 *X* 轴转动而更新。初始的 *Y* 方向可以有不同的确定方法，如果第三节点 *N*3 在创建单元时被指定，那么按右手定则，*N*1−*N*2−*N*3 所确定 3 个节点所在平面的法向即为 *Z* 向，这时 *Y* 向也就确定了。也可是使用一个局部坐标系来确定其 *Y* 方向。如果第三节点没有指定（这是允许的），同时局部坐标系也没有指定，那么全局坐标系的 *Y* 向与局部坐标系的 *X* 向通过右手定则确定 *Z* 向（同时局部的 *Y* 向也就确定了）。如果此时全局坐标系的 *Y* 向恰好与局部坐标系的 *X* 向（*N*1 与 *N*2 的连线方向）共线，则其局部坐标系的 *Y* 轴和 *Z* 轴将会是任意垂直于 *X* 轴的位置。如果使用第三节点 *N*3 来明确其局部坐标系的 *Y* 轴和 *Z* 轴，那么 *N*3 不能与 *N*1−*N*2 的连线共线，如图 15−8 所示。

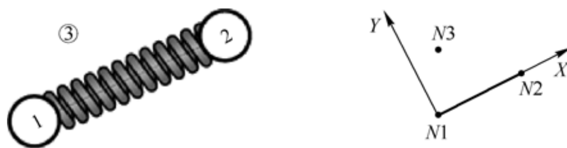


图 15−8　Spring Type 13

Spring Type 13 弯曲变形仅考虑两个节点转角的差值，即单弯曲模式。如果是承受双弯矩，则不产生任何弯曲位移，产生的是剪切变形。

Spring Type 13 的行为是一个物理梁，弯曲变形导致的长度变化同时会产生剪切效果，剪切力的产生意味着弯矩的变化。在定义其属性时，强烈建议使用有物理意义的值，输入很高的剪切刚度和零弯曲刚度会导致不正确的结果。

与 Spring Type 8 不同的是，对于 Spring Type 13，刚体转动可能不会产生任何人为的力和力矩。

Spring Type 13 的临界步长计算公式类似于 Spring Type 4，只是最终的取值由各自由度里时间步长最小的那个来确定。考虑到弯曲和剪切的耦合，其弯曲刚度修正如下：

$$K_{yy} \approx K_{yy} + l^2 * K_z$$

$$K_{zz} \approx K_{zz} + l^2 * K_y$$

Spring Type 13 是 RADIOSS 里应用最为广泛的单元类型之一，它建模方便而精确（其局部 X 向始终默认是 $N1$ 与 $N2$ 的连线方向），它具有非常强大的模拟功能，6 种变形模式相互独立，每种模式的加载与卸载独立，硬化方式多样，这些特点为它提供了几乎可以模拟任意一种两点连接关系的能力。同时它预留的复杂失效准则（如基于位移、力和内能失效）能够考虑速度效应，对于考虑动态失效的情况非常实用。对于每个单独的变形模式（或称为工作模式），其力的表达式与 Spring Type 4 类似，Spring Type 13 属性卡里包含了每种变形模式下力表达式相关参数，其本质是一个表达式在每种变形模式下的独立重复应用。差异仅仅是把平动位移换成了转角，力换成了力矩。

Spring Type 13 是前处理模块 HyperMesh 里焊点（spotweld）connector 的默认 Realize 方式。在 releaze 成功后，每个焊点处将会生成一个或一组（多层焊点）Spring Type 13，同时 HyperMesh 将自动创建相应的 Interface Type 2（绑定接触，将在后面的章节介绍），Spring Type 13 单元的端部节点被自动投影并被绑定到被焊接 Shell 单元上。其实质是使用 Spring Type 13 的 6 种变形刚度来模拟点焊连接关系。

对 Spring Type 13 六种变形模式的刚度做适当的配置，就可以用来模拟各种铰接方式。尽管 RADIOSS Block 有专用的高精度铰接单元，如/PROP/TYPE33（KJOINT），但是相对于 Spring Type 13 的简洁建模方式，稍显复杂，因此工程实际中有时会使用长度很小的 Spring Type 13 来模拟各种铰接。下面是几个简单的示例，实际使用时各刚度值应根据实际的单位制进行调整，如图 15−9 所示。

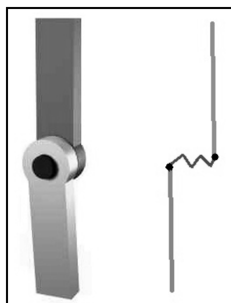
Spring Type 13 的属性卡片格式如表 15−9 所示。

表 15−9　Spring Type 13 的属性卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/PROP/TYPE13/prop_ID/unit_ID or /PROP/SPR_BEAM/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
Mass		Inertia		skew_ID	sens_ID	I_{sflag}	I_{fail}	I_{leng}	I_{fail2}
K_{Tens}		C_{Tens}		A_{Tens}		B_{Tens}		D_{Tens}	
fct_ID_1	H_{Tens}	fct_ID_2	fct_ID_3			$\delta_{min\ Tens}$		$\delta_{max\ Tens}$	
$Fscale_{Tens}$		E_{Tens}		$Ascale_{Tens}$					
$K_{Y\ Shear}$		$C_{Y\ Shear}$		$A_{Y\ Shear}$		$B_{Y\ Shear}$		$D_{Y\ Shear}$	
fct_ID_{21}	$H_{Y\ Shear}$	fct_ID_{22}	fct_ID_{23}			$\delta_{min\ Y\ Shear}$		$\delta_{max\ Y\ Shear}$	
$Fscale_{Y\ Shear}$		$E_{Y\ Shear}$		$Ascale_{Y\ Shear}$					
$K_{Z\ Shear}$		$C_{Z\ Shear}$		$A_{Z\ Shear}$		$B_{Z\ Shear}$		$D_{Z\ Shear}$	
fct_ID_{24}	$H_{Z\ Shear}$	fct_ID_{25}	fct_ID_{26}			$\delta_{min\ Z\ Shear}$		$\delta_{max\ Z\ Shear}$	
$Fscale_{Z\ Shear}$		$E_{Z\ Shear}$		$Ascale_{Z\ Shear}$					
K_{Tors}		C_{Tors}		A_{Tors}		B_{Tors}		D_{Tors}	
fct_ID_{11}	H_{Tors}	fct_ID_{12}	fct_ID_{13}			θmin Tors		θmax Tors	
$Fscale_{Tors}$		E_{Tors}		$Ascale_{Tors}$					
$K_{Y\ Bend}$		$C_{Y\ Bend}$		$A_{Y\ Bend}$		$B_{Y\ Bend}$		$D_{Y\ Bend}$	
fct_ID_{31}	$H_{Y\ Bend}$	fct_ID_{32}	fct_ID_{33}			θmin Y Bend		θmax Y Bend	

（续）

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
/PROP/TYPE13/prop_ID/unit_ID or /PROP/SPR_BEAM/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
Mass		Inertia		skew_ID	sens_ID	I_{sflag}	I_{fail}	I_{leng}	I_{fail2}
$Fscale_{Y\ Bend}$		$E_{Y\ Bend}$		$Ascale_{Y\ Bend}$					
$K_{Z\ Bend}$		$C_{Z\ Bend}$		$A_{Z\ Bend}$		$B_{Z\ Bend}$		$D_{Z\ Bend}$	
fct_ID_{34}	$H_{Z\ Bend}$	fct_ID_{35}	fct_ID_{36}			θmin Z Bend		θmax Z Bend	
$Fscale_{Z\ Bend}$		$E_{Z\ Bend}$		$Ascale_{Z\ Bend}$					
v_0		ω_0							
c_1		n_1		α_1		β_1			
$c_{XY\ Shear}$		$n_{XY\ Shear}$		$\alpha_{XY\ Shear}$		$\beta_{XY\ Shear}$			
$c_{XZ\ Shear}$		$n_{XZ\ Shear}$		$\alpha_{XZ\ Shear}$		$\beta_{XZ\ Shear}$			
$c_{X\ Tors}$		$n_{X\ Tors}$		$\alpha_{X\ Tors}$		$\beta_{X\ Tors}$			
$c_{Y\ Bend}$		$n_{Y\ Bend}$		$\alpha_{Y\ Bend}$		$\beta_{Y\ Bend}$			
$c_{Z\ Bend}$		$n_{Z\ Bend}$		$\alpha_{Z\ Bend}$		$\beta_{Z\ Bend}$			



K_{Tens}=1.0E5

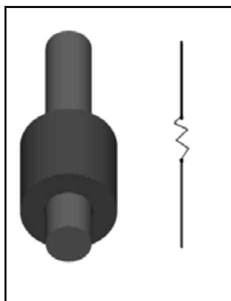
K_{YShear}=1.0E5

K_{ZShear}=1.0E5

K_{Tors}=0

K_{YBend}=1.0E6

K_{ZBend}=1.0E6



K_{Tens}=0

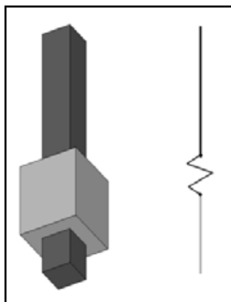
K_{YShear}=1.0E5

K_{ZShear}=1.0E5

K_{Tors}=0

K_{YBend}=1.0E6

K_{ZBend}=1.0E6



K_{Tens}=0

K_{YShear}=1.0E5

K_{ZShear}=1.0E5

K_{Tors}=1.0E6

K_{YBend}=1.0E6

K_{ZBend}=1.0E6

图 15-9　几个简单的示例

各参数的解释如表 15-10 所示。

表 15-10　Spring Type 13 的属性参数说明

数　据　域	内　　容
prop_ID	Property ID，整数，最大为 10 位
unit_ID	可选单位系统 ID，整数，最大为 10 位
prop_title	Property 标题，字符，最大为 100 位
Mass	Spring 的质量，实数
Inertia	Spring 的惯量，实数
skew_ID	坐标系 ID，整数
sens_ID	Sensor ID，整数
I_{sflag}	Sensor 标识，整数
I_{fail}	失效准则标识，整数 = 0：单自由度失效准则 = 1：多自由度合成失效准则
I_{leng}	单位长度输入标识，整数 = 0：正常计算弹簧的力 = 1：按所有输入是单位长度
I_{fail2}	失效准则标识，整数，默认是 0 = 0：旧的位移失效准则 = 1：新的位移失效准则 = 2：力准则 = 3：内能准则
K_{Tens}	拉伸刚度，实数
C_{Tens}	拉伸阻尼，实数
A_{Tens}	拉伸 A 系数，实数，默认为 1
B_{Tens}	拉伸 B 系数，实数，默认为 1
D_{Tens}	拉伸 D 系数，实数，默认为 1
E_{Tens}	δ 系数，实数
$Ascale_{Tens}$	δ 缩放系数（fct_ID_1 和 fct_ID_3），实数
fct_ID_1	定义 f(δ)的曲线 ID，整数 = 0：线性弹簧
H_{Tens}	拉伸硬化标识，整数 = 0：非线性弹性弹簧 = 1：弹塑性各向同性硬化 = 2：弹塑性，拉伸与压缩非耦合硬化 = 4：kinematic 硬化 = 5：弹塑性非线性卸载
fct_ID_2	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：g($\dot{\delta}$) = 0
fct_ID_3	如果 $H_{Tens} = 4$：下屈服曲线的 ID 如果 $H_{Tens} = 5$：残余位移与最大位移的函数曲线 ID 实数
$\delta_{min\ Tens}$	负的拉伸失效极限，实数，默认 = -10^{30}
$\delta_{max\ Tens}$	正的拉伸失效极限，实数，默认 = 10^{30}
$Fscale_{Tens}$	$\dot{\delta}$ 的缩放因子，实数
$K_{Y\ Shear}$	Y 剪切刚度，实数

（续）

数 据 域	内 容
$C_{Y\ \mathrm{Shear}}$	Y 剪切阻尼，实数
$A_{Y\ \mathrm{Shear}}$	Y 剪切 A 系数，实数，默认为 1
$B_{Y\ \mathrm{Shear}}$	Y 剪切 B 系数，实数，默认为 1
$D_{Y\ \mathrm{Shear}}$	Y 剪切 D 系数，实数，默认为 1
$\mathrm{Ascale}_{Y\ \mathrm{Shear}}$	δ 缩放系数（$\mathrm{fct_ID}_1$ 和 $\mathrm{fct_ID}_3$），实数
$\mathrm{fct_ID}_{21}$	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：g($\dot{\delta}$) = 0
$H_{Y\ \mathrm{Shear}}$	Y 剪切硬化标识，整数 = 0：非线性弹性弹簧 = 1：弹塑性各向同性硬化 = 2：弹塑性，拉伸与压缩非耦合硬化 = 4：kinematic 硬化 = 5：弹塑性非线性卸载
$\mathrm{fct_ID}_{22}$	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：g($\dot{\delta}$) =0
$\mathrm{fct_ID}_{23}$	如果 H_{Tens}=4：下屈服曲线的 ID 如果 H_{Tens}=5：残余位移与最大位移的函数曲线 ID 实数
$\delta_{\min\ Y\ \mathrm{Shear}}$	负的 Y 剪切失效极限，实数，默认=-10^{30}
$\delta_{\max\ Y\ \mathrm{Shear}}$	正的 Y 剪切失效极限，实数，默认=10^{30}
$\mathrm{Fscale}_{Y\ \mathrm{Shear}}$	$\dot{\delta}$ 的缩放因子，实数
$E_{Y\ \mathrm{Shear}}$	δ 系数，实数
$K_{Z\ \mathrm{Shear}}$	Z 剪切刚度，实数
$C_{Z\ \mathrm{Shear}}$	Z 剪切阻尼，实数
$A_{Z\ \mathrm{Shear}}$	Z 剪切 A 系数，实数，默认为 1
$B_{Z\ \mathrm{Shear}}$	Z 剪切 B 系数，实数，默认为 1
$D_{Z\ \mathrm{Shear}}$	Z 剪切 D 系数，实数，默认为 1
$\mathrm{Ascale}_{Z\ \mathrm{Shear}}$	δ 缩放系数（$\mathrm{fct_ID}_1$ 和 $\mathrm{fct_ID}_3$），实数
$\mathrm{fct_ID}_{24}$	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：g($\dot{\delta}$) = 0
$H_{Z\ \mathrm{Shear}}$	Z 剪切硬化标识，整数 = 0：非线性弹性弹簧 = 1：弹塑性各向同性硬化 = 2：弹塑性，拉伸与压缩非耦合硬化 = 4：kinematic 硬化 = 5：弹塑性非线性卸载
$\mathrm{fct_ID}_{25}$	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：g($\dot{\delta}$) = 0
$\mathrm{fct_ID}_{26}$	如果 H_{Tens}=4：下屈服曲线的 ID 如果 H_{Tens}=5：残余位移与最大位移的函数曲线 ID 实数
$\delta_{\min\ Z\ \mathrm{Shear}}$	负的 Z 剪切失效极限，实数，默认=-10^{30}
$\delta_{\max\ Z\ \mathrm{Shear}}$	正的 Z 剪切失效极限，实数，默认=10^{30}
$\mathrm{Fscale}_{Z\ \mathrm{Shear}}$	$\dot{\delta}$ 的缩放因子，实数
$E_{Z\ \mathrm{Shear}}$	δ 系数，实数

（续）

数 据 域	内 容
K_{Tors}	扭转刚度，实数
C_{Tors}	扭转阻尼，实数
A_{Tors}	扭转 A 系数，实数，默认为 1
B_{Tors}	扭转 B 系数，实数，默认为 1
D_{Tors}	扭转 D 系数，实数，默认为 1
$Ascale_{Tors}$	δ缩放系数（fct_ID_1 和 fct_ID_3），实数
fct_ID_{11}	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：$g(\dot{\delta}) = 0$
H_{Tors}	扭转硬化标识，整数 = 0：非线性弹性弹簧 = 1：弹塑性各向同性硬化 = 2：弹塑性，拉伸与压缩非耦合硬化 = 4：kinematic 硬化 = 5：弹塑性非线性卸载
fct_ID_{12}	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：$g(\dot{\delta}) =0$
fct_ID_{13}	如果 H_{Tens}=4：下屈服曲线的 ID 如果 H_{Tens}=5：残余位移与最大位移的函数曲线 ID 实数
$\theta_{min\ Tors}$	负的扭转失效极限，实数，默认 = -10^{30}
$\theta_{max\ Tors}$	正的扭转失效极限，实数，默认 = 10^{30}
$Fscale_{Tors}$	$\dot{\delta}$ 的缩放因子，实数
E_{Tors}	δ系数，实数
$K_{Y\ Bend}$	Y 弯曲刚度，实数
$C_{Y\ Bend}$	Y 弯曲阻尼，实数
$A_{Y\ Bend}$	Y 弯曲 A 系数，实数，默认为 1
$B_{Y\ Bend}$	Y 弯曲 B 系数，实数，默认为 1
$D_{Y\ Bend}$	Y 剪切 D 系数，实数，默认为 1
$Ascale_{Y\ Bend}$	δ缩放系数（fct_ID_1 和 fct_ID_3），实数
fct_ID_{31}	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：$g(\dot{\delta}) = 0$
$H_{Y\ Bend}$	Y 弯曲硬化标识，整数 = 0：非线性弹性弹簧 = 1：弹塑性各向同性硬化 = 2：弹塑性，拉伸与压缩非耦合硬化 = 4：kinematic 硬化 = 5：弹塑性非线性卸载
fct_ID_{32}	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：$g(\dot{\delta}) = 0$
fct_ID_{33}	如果 H_{Tens}=4：下屈服曲线的 ID 如果 H_{Tens}=5：残余位移与最大位移的函数曲线 ID 实数
$\theta_{min\ Y\ Bend}$	负的 Y 弯曲失效极限，实数，默认 = -10^{30}
$\theta_{max\ Y\ Bend}$	正的 Y 弯曲失效极限，实数，默认 = 10^{30}
$Fscale_{Y\ Bend}$	$\dot{\delta}$ 的缩放因子，实数
$E_{Y\ Bend}$	δ系数，实数

（续）

数　据　域	内　　容
$K_{Z\ \mathrm{Bend}}$	Z 弯曲刚度，实数
$C_{Z\ \mathrm{Bend}}$	Z 弯曲阻尼，实数
$A_{Z\ \mathrm{Bend}}$	Z 弯曲 A 系数，实数，默认为 1
$B_{Z\ \mathrm{Bend}}$	Z 弯曲 B 系数，实数，默认为 1
$D_{Z\ \mathrm{Bend}}$	Z 剪切 D 系数，实数，默认为 1
$\mathrm{Ascale}_{Z\ \mathrm{Bend}}$	δ缩放系数（$\mathrm{fct_ID}_1$ 和 $\mathrm{fct_ID}_3$），实数
$\mathrm{fct_ID}_{34}$	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：g($\dot{\delta}$) = 0
$H_{Z\ \mathrm{Bend}}$	Z 弯曲硬化标识，整数 = 0：非线性弹性弹簧 = 1：弹塑性各向同性硬化 = 2：弹塑性，拉伸与压缩非耦合硬化 = 4：kinematic 硬化 = 5：弹塑性非线性卸载
$\mathrm{fct_ID}_{35}$	定义 g(δ)的曲线 ID，整数 = 0：g($\dot{\delta}$) = 0
$\mathrm{fct_ID}_{36}$	如果 H_{Tens}=4 = 下屈服曲线的 ID 如果 H_{Tens}=5 = 残余位移与最大位移的函数曲线 ID 实数
$\theta_{\min\ Z\ \mathrm{Bend}}$	负的 Z 弯曲失效极限，实数，默认 = -10^{30}
$\theta_{\max\ Z\ \mathrm{Bend}}$	正的 Z 弯曲失效极限，实数，默认 = 10^{30}
$\mathrm{Fscale}_{Z\ \mathrm{Bend}}$	$\dot{\delta}$ 的缩放因子，实数
$\mathrm{E}_{Z\ \mathrm{Bend}}$	δ系数，实数
V_0	参考平动速度，实数，默认为 1.0
ω_0	X 方向平动的参考转速，实数，默认为 1.0
c_1	X 方向平动的相对转速系数，实数，默认为 1.0
n_1	X 方向平动的相对转速指数，实数，默认为 1.0
α_1	X 方向平动的乘积因子，实数，默认为 1.0
β_1	X 方向平动的指数，实数，默认为 2.0
$c_{XY\ \mathrm{Shear}}$	XY 方向剪切的相对速度系数，实数，默认为 0.0
$n_{XY\ \mathrm{Shear}}$	XY 方向剪切的相对速度指数，实数，默认为 0.0
$\alpha_{XY\ \mathrm{Shear}}$	XY 方向剪切的乘积因子，实数，默认为 1.0
$\beta_{XY\ \mathrm{Shear}}$	XY 方向剪切的指数，实数，默认为 2.0
$c_{XZ\ \mathrm{Shear}}$	XZ 方向剪切的相对速度系数，实数，默认为 0.0
$n_{XZ\ \mathrm{Shear}}$	XZ 方向剪切的相对速度指数，实数，默认为 0.0
$\alpha_{XZ\ \mathrm{Shear}}$	XZ 方向剪切的乘积因子，实数，默认为 1.0
$\beta_{XZ\ \mathrm{Shear}}$	XZ 方向剪切的指数，实数，默认为 2.0
$c_{X\ \mathrm{Tors}}$	X 方向扭转的相对速度系数，实数，默认为 0.0
$n_{X\ \mathrm{Tors}}$	X 方向扭转的相对速度指数，实数，默认为 0.0
$\alpha_{X\ \mathrm{Tors}}$	X 方向扭转的乘积因子，实数，默认为 1.0
$\beta_{X\ \mathrm{Tors}}$	X 方向扭转的指数，实数，默认为 2.0
$c_{Y\ \mathrm{Bend}}$	Y 方向弯曲的相对速度系数，实数，默认为 0.0
$n_{Y\ \mathrm{Bend}}$	Y 方向弯曲的相对速度指数，实数，默认为 0.0

（续）

数 据 域	内 容
$\alpha_{Y\,\mathrm{Bend}}$	*Y* 方向弯曲的乘积因子，实数，默认为 1.0
$\beta_{Y\,\mathrm{Bend}}$	*Y* 方向弯曲的指数，实数，默认为 2.0
$c_{Z\,\mathrm{Bend}}$	*Z* 方向弯曲的相对速度系数，实数，默认为 0.0
$n_{Z\,\mathrm{Bend}}$	*Z* 方向弯曲的相对速度指数，实数，默认为 0.0
$\alpha_{Z\,\mathrm{Bend}}$	*Z* 方向弯曲的乘积因子，实数，默认为 1.0
$\beta_{Z\,\mathrm{Bend}}$	*Z* 方向弯曲的指数，实数，默认为 2.0

（1）$\delta = l - l_0$，是 Spring Type 13 的长度变化量：当前长度减去初始建模长度。

（2）如果 $I_{\mathrm{leng}} = 0$，那么弹簧的力如下计算：

对于线性弹簧：$F = K\delta + C\dot{\delta}$。

对于非线性弹簧：

$$F = f\left(\frac{\delta}{Ascale_x}\right)\cdot\left[A + B\ln\left|\frac{\dot{\delta}}{D}\right| + Eg\left(\frac{\dot{\delta}}{F}\right)\right] + C\dot{\delta}\text{，其中，} -l_0 < \delta < \infty\text{。}$$

（3）如果 sens_ID≠0 并且 $I_{\mathrm{sflag}} = 0$，那么 Spring 单元将由 sens_ID 激活。

（4）如果 sens_ID≠0 并且 $I_{\mathrm{sflag}} = 1$，那么 Spring 单元将由 sens_ID 关闭。

（5）Spring 单元用 Sensor 激活或关闭，主要用在预紧问题的建模上。

（6）如果使用 Sensor 来控制 Spring 的激活状态，那么 Sensor 作动时弹簧的长度等于 0 时刻弹簧两个节点之间的距离。

（7）如果 $I_{\mathrm{leng}} = 1$，那么所有的输入按单位长度考虑：Spring 的质量 = Mass* L_0，Spring 的刚度 = K/L_0，Spring 的阻尼 = C/L_0，Spring 的惯量 = $I*L_0$，L_0 是 Spring 的参考长度。

同时，力曲线需要按工程应变和工程应变率输入，应变失效准则按应变方式输入。

输入负的失效长度 = $\delta_{\min}/L_0$，正的失效长度也是这样。

弹簧的力按如下计算：

对于线性弹簧：$F = K\varepsilon + C\dot{\varepsilon}$。

对于非线性弹簧：

$$F = f\left(\frac{\varepsilon}{Ascale_x}\right)\cdot\left[A + B\ln\left|\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right| + Eg\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{F}\right)\right] + C\dot{\varepsilon}\text{，其中 } \varepsilon = \delta / l_0\text{，} L_0 \text{是参考长度。}$$

（8）当 $I_{\mathrm{leng}} = 1$ 时，所有失效准则都是基于变形与极限变形的比值定义的。负的失效位移需要输入应变形式 δ/L_0，而不是变形量 δ。

（9）如果输入的 K 比屈服曲线的最大斜率小（K 不是屈服曲线的最大斜率），那么 K 将被置为该曲线的最大斜率。

（10）失效极限是位移、力还是内能，依赖于标识 I_{fail2} 的值。如果是内能准则，那么仅正值有意义，且仅正值会被考虑。如果 $\delta_{\min}$（或者 $\delta_{\max}$）是 0，那么负方向（或者正方向）无失效。$\delta_{\min}$ 必须是负值。如果硬化标识 $H = 4$，那么硬化是 kinematic 的，上下屈服曲线相同。

（11）如果硬化标识 $H = 5$，残余位移是最大位移的函数，$\delta_{\mathrm{resid}} = f_{\mathrm{N3}}(\delta_{\max})$。

（12）失效准则：

如果失效准则是单方向的，那么一旦 Spring Type 13 的任一个方向上满足如下关系，则

该单元立即失效。

$\dfrac{\delta^i}{\delta^i_{fail}} \geqslant 1$，其中 δ *i*fail 是方向 *i*（=1,…,6）上的失效位移。

对于任一方向，如果 δ^i 是负的，则 δ^{i}_{fail} 取 δ_{min}；如果 δ^i 是正的，则 δ^{i}_{fail} 取 δ_{max}。

如果失效准则是多方向合成的，那 Spring Type 13 失效的条件变为

$\sum_i \alpha^i \left(\dfrac{\delta^i}{\delta^i_{fail}}\right)^{\beta i} \geqslant 1$，其中，$i = 1,\cdots,6$。

对于旧的失效准则（$I_{fail2} = 0$），系数项 α^i 和 β^i 分别等于 1.0 和 2.0，则失效公式简化为

$$\left(\frac{\delta^1}{\delta^1_{fail}}\right)^2 + \left(\frac{\delta^2}{\delta^2_{fail}}\right)^2 + \left(\frac{\delta^3}{\delta^3_{fail}}\right)^2 + \left(\frac{\delta^4}{\delta^4_{fail}}\right)^2 + \left(\frac{\delta^5}{\delta^5_{fail}}\right)^2 + \left(\frac{\delta^6}{\delta^6_{fail}}\right)^2 \geqslant 1$$

新的失效公式（I_{fail2}>0）允许模拟平动自由度方向与该方向平动速度相关的失效极限：

$$\delta^i_{fail} = \begin{cases} \delta^i_{\max} + c_i \cdot abs\left(\dfrac{v^i}{v_0}\right)^{ni}, & if(\delta^i > 0) \\ \delta^i_{\min} - c_i \cdot abs\left(\dfrac{v^i}{v_0}\right)^{ni}, & if(\delta^i \leqslant 0) \end{cases}$$

，其中，$\delta_{min/max}$ 是平动方向的静。

态失效极限（见数据行 5，8 和 11），而 *v*0 是参考速度。

对于力和内能失效准则，公式为

$\delta^i_{fail} = \delta^i_{\max} + c_i \cdot abs\left(\dfrac{v^i}{v_0}\right)^{n_i}$，（如果 $\delta^i > 0$），只是将位移换成力或者能量。

对于线性弹簧，函数 *f* 和 *g* 是空的，*A*, *B*, *E* 均不计入考虑。

请注意，参数 $\theta_{min\ Tors}$ 和 $\theta_{max\ Tors}$ 的单位是弧度（radians）。

与平动自由度一样，新的失效公式（I_{fail2}>0）允许模拟转动自由度方向与该方向转动速度相关的失效极限：

$$\theta^i_{fail} = \begin{cases} \theta^i_{\max} + c_i \cdot abs\left(\dfrac{\omega^i}{\omega_0}\right)^{ni}, & if(\theta^i > 0) \\ \theta^i_{\min} - c_i \cdot abs\left(\dfrac{\omega^i}{\omega_0}\right)^{ni}, & if(\theta^i \leqslant 0) \end{cases}$$

，其中，$\theta_{min/max}$ 是转动方向的静态失。

效极限（见数据行 14，17 和 20），而 ω_0 是参考速度。

对于力和内能失效准则，公式为

$\theta^i_{fail} = \theta^i_{\max} + c_i \cdot abs\left(\dfrac{\omega^i}{\omega_0}\right)^{n_i}$，（如果 $\theta^i > 0$），只是将位移换成力矩或者能量。

节点 *N*1 和 *N*2 的连线方向始终是 Spring Type 13 的局部坐标系 *X* 方向，如果在定义单元时，节点 *N*3 没有指定（对于 Spring Type 13 这是允许的），那么单元的局部坐标系的 *Z* 方向，将由其 *X* 方向与指定的坐标系（见属性卡片 skew_ID 项）的 *Y* 方向进行向量叉乘得到 $\vec{Z} = \vec{X} \times \vec{Y}_{skew}$。如果同时也没有定义指定的坐标系（skew_ID）为空或者 0，则全局坐标系 *Y* 向被用于确定其局部坐标系的 *Z* 向 $\vec{Z} = \vec{X} \times \vec{Y}_{global}$。

15.2 2D 单元

Shell（板壳）单元由中面网格和厚度属性定义，基于厚度远小于其他两个维度的假设，如图 15−10 所示。Shell 单元是最常用的单元，例如在汽车碰撞模型中，90%以上的单元都是 Shell 单元，它们包含膜、弯曲和剪切变形，厚度方向正应力始终是 0。

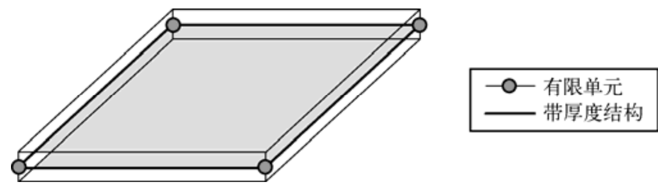


图 15−10　Shell 单元定义

RADIOSS 里标准的 Shell 单元是带横向剪切变形的 Mindlin 板单元，这种单元比标准的 Kirchhoff 单元精确，后者不考虑横向剪切变形，以至于初始垂直于中面的几何横截面在变形后依然垂直于中面。

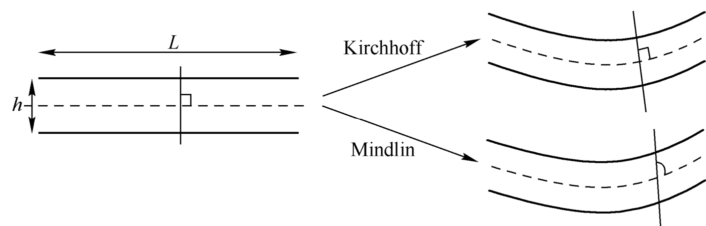


图 15−11　Shell 理论假设

尽管 Kirchhoff 模型精度稍低，如果 L/h>20，kirchhoff 假设还是正确的。但是如果 L/h 在 10～20 时，这种初始垂直于中面的横截面依然垂直于中面的假设就不再成立。而 Mindlin 板始终考虑横向剪切，不存在理论假设不成立的问题。RADIOSS Block 里减缩积分 Shell 单元（无论 3 节点还是四节点）都是基于 Mindlin 假设，没有特别的公式用于解决单元节点偏离几何中面的情况，因此对于薄壁结构的网格离散，使用中面划分网格是非常重要的。

在碰撞分析中，Shell 单元公式是一个很重要的要素。RADIOSS 的 Shell 单元都是基于 Mindlin−Ressner 板壳理论。这种公式不但对薄板壳有效，对与厚板壳也基本适用。RADIOSS 不但有因为计算效率而最流行的减缩积分 Shell 单元，还有完全积分的四边形壳单元（QBAT）和三角形单元（DKT18）。表 15−11 给出了各种壳单元的概况。

表 15−11　RADIOSS Shell 单元概要

网　　格	单元名称	面内积分点数	沙漏公式	注　　释
z, N_1, N_2, N_3, N_4	BT（Q4）	1	4 种沙漏公式	法向恒定 沙漏公式 3 和 4 比默认的 1 好

（续）

网　　格	单元名称	面内积分点数	沙漏公式	注　　释
	QEPH	1	物理稳定	节点法向 无沙漏能输出
	QBAT	2×2	全积分单元	节点法向 无沙漏能
	C0	1	————	平面单元 无沙漏能
	DKT18	3	————	Kirchhoff 壳（仅薄板壳） t/L 越大，时间步长越小
	S3N6	1	————	Kirchhoff 壳（仅薄板壳） 无转动自由度 变得旋转由相邻边的垂向位移确定

对于给定的应用领域，如何选择 Shell 的单元公式需要一定的经验，下面是选择 Shell 单元公式的可能有用的基本概念：

（1）BT 单元简单、高效、计算开销小。作为减缩积分单元，这种单元对网格质量不是太敏感，可以用于较粗糙的网格。

（2）对于准静态分析、精细网格、翘曲表面、屈曲，这些情况选择 QEPH 或者 QBAT 是明智的。

（3）QBAT 是 RADIOSS 里精度最高的 Shell 单元公式，但是由于它是完全积分，其计算开销是 BT 单元的 2～3 倍。

（4）QEPH 是精度和计算开销协调最好的 Shell 单元，它相对 BT 单元增加的计算开销不大于 15%，而其得到的结果接近于完全积分的 QBAT 单元。

（5）不建议使用三角形单元。C0 单元太刚硬，而 DKT18 计算消耗很高。为了保证结果的质量，一般应限制三角形单元比例不超过 5%。

（6）S3N6 单元在弯曲行为精度同 DKT18，可以应用在一些特殊的领域，比如冲压仿真。

求解精度与网格的基本关系如图 15-12 所示。

对于弹性 Shell，正应力沿厚度方向是线性分布的，因此单元内能可以使用解析积分方

法获得。在塑性情况下，这个应力分布是非线性的，并且至少需要在厚度方向 3 个积分点才可以将这种非线性考虑进去。这种非线性的应力分布需要增加积分点数才能够计量，同时单元内能的估算的精度依赖于积分点数。因此需要在考虑材料非线性、料厚和弯曲速率的前提下调和计算开销与解的精度关系。厚度方向使用过 5 个积分点能够给出较好的结果，尤其对于厚度超过 2mm 的板，当然这样带来的 CPU 开销的增加也是不能忽略的。仿真无弯曲和横剪的膜单元时，厚度方向使用 1 个积分点就够了。当然，对于线弹性材料（Law1），由于是可解析的，厚度方向积分点数可以忽略。

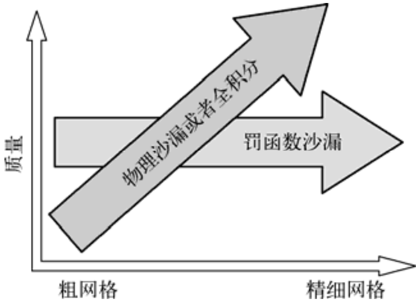


图 15−12　Shell 单元在不同网格里的应用

另一个低 CPU 开销而结果相当精确的做法是使用全局积分。这种积分方式把 Mises 塑性准则转化为成 Illuyshin 准则，这样积分点处的应力分量被内力（N, M,T…）取代。

Shell 单元的属性卡片格式如表 15−12 所示。

表 15−12　Shell 单元的属性卡片

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
/PROP/TYPE1/prop_ID/unit_ID or /PROP/SHELL/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
I_{shell}	I_{smstr}	I_{sh3n}	I_{drill}						
h_m		h_f		h_r		d_m		d_n	
N	I_{strain}	Thick		A_{shear}			I_{thick}	I_{plas}	

各参数的解释如表 15−13 所示。

表 15−13　Shell 单元的属性参数说明

数　据　域	内　　容
prop_ID	Property ID，整数，最大为 10 位
unit_ID	可选单位系统 ID，整数，最大为 10 位
prop_title	Property 标题，字符，最大为 100 位
I_{shell}	4 节点 Shell 单元公式标识，整数 = 0：使用/DEF_SHELL 的定义 = 1：Q4，粘弹性沙漏模式，与变形及刚体模式正交（Belytschko） = 2：Q4，粘弹性沙漏模式，非正交（Hallquist） = 3：Q4，弹塑性沙漏模式，带正交 = 4：Q4，改进的第 1 中沙漏模式（与翘曲单元正交） = 12：全积分的 QBAT 或 DKT18 公式 = 24：QEPH 单元公式
I_{smstr}	Shell 的小应变公式标识，整数 = 0：使用/DEF_SHELL 的定义 = 1：从时刻 0 开始使用小应变（公式与其他所有 I_{shell} 公式兼容） = 2：完全几何非线性含可能被 Engine 卡片（/DT/SHELL/CST）激活的小应变 = 3：陈旧的小应变公式（仅与 I_{shell} = 2 兼容） = 4：完全的几何非线性（Engine 卡片/DT/SHELL/CST 不起作用）

（续）

数　据　域	内　　容
I_{sh3n}	3 节点 Shell 单元公式标识，整数 = 0：使用/DEF_SHELL 的定义 = 1：标准三角形单元（C0） = 2：带大转动修正的标准三角形单元（C0） = 30：DKT18 = 31：DKT_S3
I_{drill}	Drilling 自由度刚度标识，整数 = 0：默认为 2 = 1：yes = 2：no
h_m	Shell 膜沙漏系数，实数，默认为 0.01
h_f	Shell 面外的沙漏，实数，默认为 0.01
h_r	Shell 转动沙漏系数，实数，默认为 0.01
d_m	Shell 膜阻尼，实数
d_n	Shell 数值阻尼，实数
N	厚度方向积分点数（0≤N≤10），实数 默认为 0，此时使用全局积分模式
I_{strain}	后处理是否计算应变，整数 = 0：使用/DEF_SHELL 的定义 = 1：yes = 2：no
Thick	Shell 厚度，实数
A_{shear}	剪切系数，实数，默认为 Reissner 值：5/6
I_{thick}	Shell 合成应力计算标识，整数 = 0：使用/DEF_SHELL 的定义 = 1：考虑厚度的变化 = 2：厚度恒定
I_{plas}	Shell 平面应力塑性标识，整数 = 0：使用/DEF_SHELL 的定义 = 1：用 3 次 Newton 迭代来迭代投影 = 2：半径回归

15.3　3D 单元

15.3.1　体单元（Solid）

RADIOSS Block 里有线性插值的六面体和四面体单元，也有二次插值的六面体和四面体单元，如图 15-13 所示。线性插值的 Solid 单元在计算时间和内存消耗上有优势，主要是因为其更少的积分点数和更大的时间步长。

这 4 类 Solid 单元的特征长度（用于计算临界时间步长）分别为

TETRA4：$l_c = a\sqrt{\dfrac{2}{3}} = 0.816a$ 。

TETRA10：$l_c = a\dfrac{\sqrt{5/12}}{6} = 0.264a$ 。

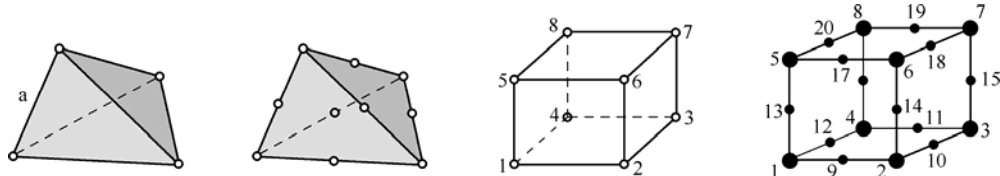


图 15−13　RADIOSS Solid 单元

BRICK8：$l_c=$体积/最大表面面积。

BRICK20：$l_c\approx$厚度/2。

表 15−14 描述了各种 Solid 单元的特点和区别。对于 BRICK8，它使用了共旋公式以避免积累误差，尤其是在单元承受大剪切变形时。当然，这种单元公式不是默认设置，需要在属性卡片里激活才可以。

表 15−14　RADIOSS Solid 单元概要

网　　格	单 元 名 称	积 分 点 数	沙 漏 公 式	注　　释
	BRICK8	1X1X1 2X2X2	1 积分点时使用罚函数	使用共旋公式 避免第二类沙漏
	HA8	2X2X2～9X9X9	—	注意 ICPRE 标识的值
	HEPE	1X1X1	物理稳定	
	BRICK20	2X2X2 或 3X3X3	—	很高的计算开销
	TETRA4	1	—	大变形时剪切锁闭 精度低
	TETRA10	4	—	高计算开销 精度好 无剪切锁闭

需要强调的是，RADIOSS Block 从 10.0 版本开始加入了一种创新的 4 节点二阶四面体单元，如图 15−14 所示，每个节点有 6 个自由度，其中转动自由度是由求解器通过内部虚拟生成的中节点通过插值表达的。这种创新的单元公式的优点是易见的：求解精度和传统的二阶四面体单元相当（也是二阶单元），但是时间步长却大得多（没有真实的中间节点）；剪切锁闭效应非常微弱；与六自由度的 Shell 单元能够很好的兼容。因此，这种单元被推荐用在难以使用六面体划分网格，同时又要求兼顾高精度与高效的情况。激活这种单元公式，仅需要在其属性卡片里设置 $I_{rot}=1$。在第 15.4.3 节里用到了这种单元公式。

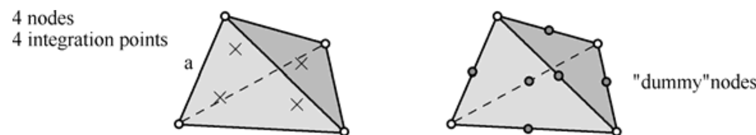


图 15−14　RADIOSS 创新的 4 节点二阶 TETRA 单元

Solid 单元的属性卡片格式如表 15-15 所示。

表 15-15　Solid 单元的属性卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/PROP/TYPE14/prop_ID/unit_ID or /PROP/SOLID/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
I_{solid}	I_{smstr}		I_{cpre}		I_{npts}	I_{rot}	I_{frame}	d_n	
q_a		q_b		h					
Δt_{min}		I_{strain}							

各参数的解释如表 15-16 所示。

表 15-16　Solid 单元的属性参数说明

数　据　域	内　　容
prop_ID	Property ID，整数，最大为 10 位
unit_ID	可选单位系统 ID，整数，最大为 10 位
prop_title	Property 标题，字符，最大为 100 位
I_{solid}	Solid 单元公式标识，整数 = 0：默认，使用/DEF_SOLID 的定义 = 1：标准 8 节点 Solid 单元，1 个积分点，粘性沙漏公式正交和刚体变形补偿（Belytschko） = 2：标准 8 节点 Solid 单元，1 个积分点，粘性沙漏公式无正交（Hallquist） = 12：标准 8 节点 Solid 单元，全积分（无沙漏） = 14：HA8，无锁闭 8 节点 Solid 单元，共旋公式，可变高斯积分点数 = 16：二阶 20 节点 Solid 单元，全积分，可变高斯积分点数 = 17：H8C，全积分协调 Solid 单元 = 24：HEPH，8 节点 Solid 单元，共旋公式，减缩积分，1 个高斯积分点，物理沙漏稳定
I_{smstr}	小应变公式标识，整数 = 0：默认，使用/DEF_SOLID 的定义 = 1：从 0 时刻使用小应变 = 2：完全几何非线性含可能被 Engine 卡片（/DT/BRICK/CST）激活的小应变 = 3：从 0 时刻使用简化的小应变公式（非客观公式） = 4：完全的几何非线性（Engine 卡片/DT/BRICK/CST 不起作用） =10：拉格朗日（Lagrange）型总应变
I_{cpre}	常压力公式标识，整数 = 0：默认 = 1：减缩压力积分 = 2：按塑性状态变化在 1～3 = 3：非减缩压力积分
I_{npts}	积分点数（仅对 I_{solid} = 14, 16），整数 = ijk（r, s, t 方向的积分点数） 2≤i, j, k≤9，I_{solid} = 14 2≤i, k≤3, 2≤j≤9，I_{solid} = 16
I_{rot}	该标识仅对 4 节点 Tetra 单元有效 =0：线性 Tetra，1 个积分点 =1：二阶 Tetra，4 个积分点，每个节点有 6 个自由度
I_{frame}	单元坐标系公式标识（仅对 QUAD 和 8 节点 Brick 的 I_{solid} = 1, 2, 12, 17），整数 = 0：默认，使用/DEF_SOLID 的定义 = 1：非共旋公式 = 2：共旋公式
d_n	稳定性数值阻尼（仅对 I_{solid} = 24），默认为 0.1，实数
q_a	二次体积粘性，默认为 1.10，实数

（续）

数 据 域	内 容
q_b	线性体积粘性，默认为 0.10，实数
h	沙漏粘性系数，默认 0.10，实数
Δt_{min}	最小时间步长，默认为 0，实数
I_{strain}	后处理是否计算应变，整数 = 0：使用/DEF_SOLID 的定义 = 1：yes = 2：no

15.3.2 厚板壳单元（Solid−Shell）

当设置 HA8、HEPE 和 BRICK20 单元在厚度方向正应力恒定时，这些单元实际上已经转化成另一类 3D 单元 Solid−Shell（厚板壳），如图 15−15 所示。这种 Solid−Shell 单元允许在厚度方向仅有一层单元时，使用 BRICK 网格来激活厚板壳单元公式。在 RADIOSS Block 里还有专门的厚板壳单元 SHELL16 和 PA6，属性卡片为/PROP/TSHELL，因此 Solid−Shell 又经常被称做 TShell。

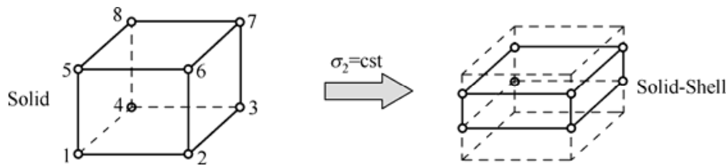


图 15−15　RADIOSS Block 的 Solid−Shell 单元

表 15−10 概括了各种 Solid−Shell 单元的特点和区别。特别地，SHELL16 是二阶单元，能够有效地建模如图 15−17 所示的厚板壳结构不规则连接。其时间步长与最短的两节点间距离有关，而与厚度及材料属性关系很小。

表 15−17　RADIOSS Block 里 Solid−Shell 概要

网 格	单 元 名 称	积 分 点 数	沙 漏 公 式
8 7 5 6 4 3 1 2	HSEPH	面内 1 个 厚度方向最多 9 个	物理稳定
	HA8	2X2X2～9X9X9	—
	PA6	面内 1 个 厚度方向最多 9 个	—
8 15 7 16 3 5 14 13 6 10 1 9 2	SHELL16	面内 3X3 或 2X2 厚度方向最多 9 个	—

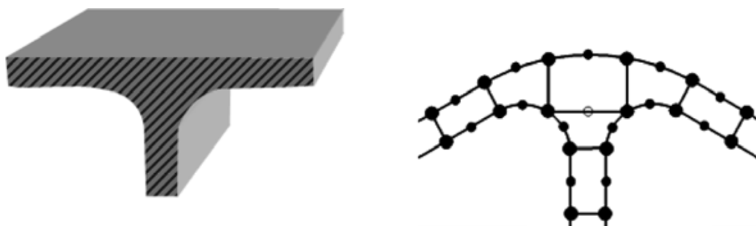


图 15-16　Solid-Shell 的应用

15.4　RADIOSS Block 单元公式应用实例

15.4.1　实例教程—圆管碰撞模拟

本教程完整地演示了两根圆管交叉碰撞仿真的建模过程，在基本求解完成后，再使用不同的 Shell 单元公式进行对比计算，以了解不同的单元公式对计算结果和计算效率的影响。

圆管模型如图 15-17 所示。

单位：长度（mm），时间（ms），质量（kg），力（kN），压强（GPa）。

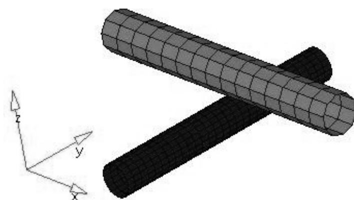


图 15-17　圆管模型

STEP 01　加载 RADIOSS（Block）用户配置文件

（1）启动 HyperMesh。

（2）从 Preferences 下拉菜单中选择 User Profiles 或者从工具栏中单击按钮。

（3）选择 RADIOSS（Block）100，单击 OK。

STEP 02　导入求解文件

（1）在工具栏中单击按钮，然后单击按钮，浏览并选择 pipesd00 文件。

（2）单击 Open。

（3）单击 Import，将模型加载到图形区域。

STEP 03　创建材料卡片（/MAT）

（1）在模型浏览器中用鼠标右键单击 Create → Material，弹出一个新的对话框。

（2）在 name 中输入 elast1。

（3）选择 type 为 Elastic，选择 card image 为 M1_ELAST。

（4）单击 Create Material。

（5）编辑卡片参数如下：

密度[Rho_I] = 7.8E−6；
杨氏模量[E] = 208；
泊松比[nu] = 0.30。

STEP 04 创建属性卡片（/PROP）

（1）在模型浏览器中用鼠标右键单击 Create → Property，弹出一个新的对话框。
（2）在 name 中输入 prop shell，选择 type 为 Surface，选择 Card image，为 P1_SHELL。
（3）单击 Create Property。
（4）编辑/PROP/SHELL 卡片，设置单元厚度 [Thick] = 2.5。

STEP 05 把/PART，/MAT 和/PROP 卡片赋予单元

（1）赋予网格粗糙的部件/PART 卡片，在卡片中指定/PROP/SHELL 的 ID 号。
（2）在模型浏览器中选择 Pipe1 和 Pipe2 部件，用鼠标右键单击选择 Edit。
（3）选择 card image 为 PART。
（4）单击 Property 栏，选中 Assign property。
（5）选择 property 为 prop shell。
（6）单击 Material 栏，选中 Assign material。
（7）选择 Material 为 elast 1。
（8）单击 update。

STEP 06 创建接触卡片

（1）单击下拉菜单，选择 BCs → Create → Interfaces。
（2）选择 create 子面板。
（3）在 name = 项中输入 contact。
（4）在 type = 项中输入 TYPE7。
（5）任意选择一种颜色。
（6）单击 create。
（7）选择 add 子面板。
（8）在 master 项，设置 entity 为 comps。
（9）单击 master 项的 comps 黄色选项框，选择 component 2 部件。
（10）单击 master 右边的 update。
（11）在 slave 项中选择 comps。
（12）单击 slave 项的 comps 黄色选项框，选择 component 1 部件。
（13）单击 slave 右边的 update。
（14）单击 review 查看图形区域的接触对，主对象为蓝色，从对象为红色。

（15）选择 card image 子面板。

（16）单击 edit 编辑卡片。

（17）设置摩擦系数[FRIC]为 0.1。

本步骤定义了两管的/INTER/TYPE7 接触卡片。

STEP 07 定义初始速度

（1）在 Utility 浏览器中，单击 BC’s Manager，在 Name 项中输入 tran_vel，设置 Select type 为 initial velocity。

（2）设置 GRNOD 为 Parts，单击 Parts 并选择网格粗糙的管（部件 ID 为 2）。

（3）单击 proceed。

（4）在 initial velocity components 项中，分别设置 Vx、Vy、Vz 为 0、0、−30。

（5）有一个选项是选择初始速度卡片的局部坐标系的。如果没有指定局部坐标系，那么就默认为全局坐标系。

（6）Label Scale 选项可以设置载荷的显示大小。

（7）单击 create 参加初始速度载荷，*Z* 轴负方向的初始速度创建完毕。

STEP 08 创建/BCS 卡片，固定细网格管件的端部

（1）在 BC’s Manager 中，在 Name 项中输入 SPC，设置 Select type 为 Boundary Condition。

（2）设置 GRNOD 为 Nodes，选择细网格管两端的节点。

（3）在 Boundary condition components 项中，勾选所有的复选框，单击 Create 对细网格管的两端单元节点进行全约束，如图 15−18 所示。

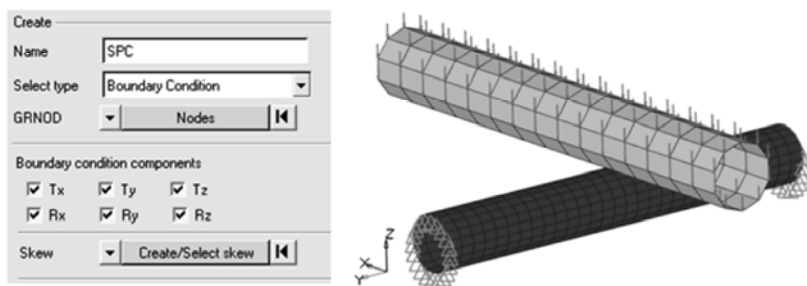


图 15−18　创建约束

STEP 09 创建输出定义和控制卡片

（1）在 Utilities 浏览器中，选择 Engine File，弹出图形用户界面。

（2）按如图 15−19 和图 15−20 所示进行参数设置。

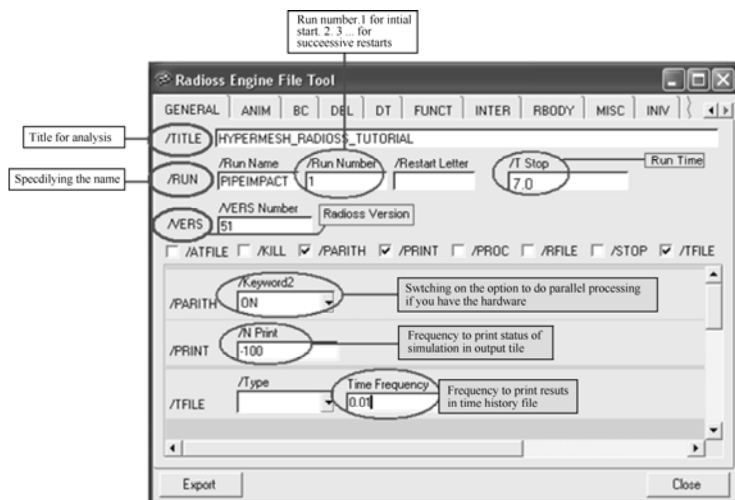


图 15–19　设置 GENERAL 面板

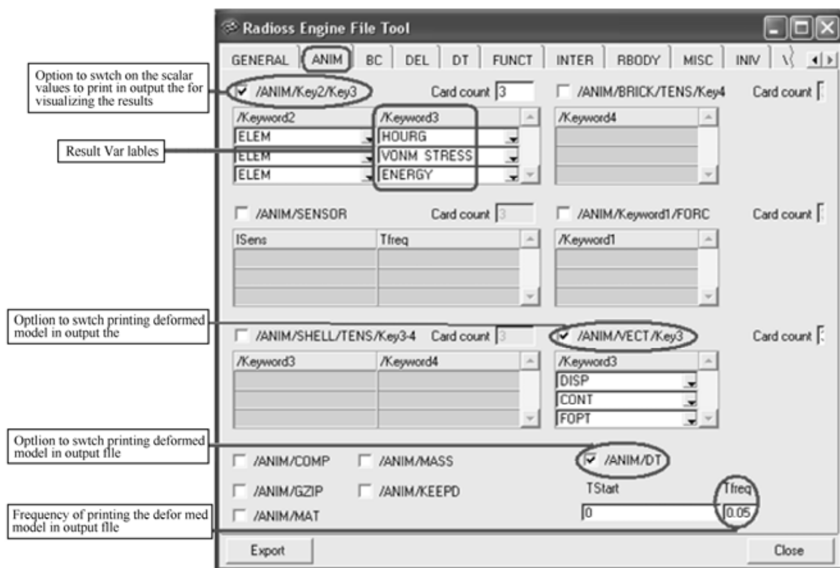


图 15–20　设置 ANIM 面板

（3）单击 Apply 和 Close。

STEP 10 输出模型

（1）在工具栏中单击“输出”按钮。

（2）在 File 栏中单击按钮，指定工作路径。

（3）在 Name 项中输入 pipe 并单击 Save。

（4）单击下拉箭头，展开 Export options。

（5）单击 Merge starter and engine file，输出 Starter 和 Engine 文件。

（6）单击 Export 输出模型和 Engine 文件。

（7）在系统开始菜单里打开 RADIOSS Manager，在 Input file（s）栏中选择刚刚导出的模型，在 Options 栏里输入−both 参数，单击 Run 来提交求解。

本教程模型的最终求解变形及能量曲线如图 15−21 所示。

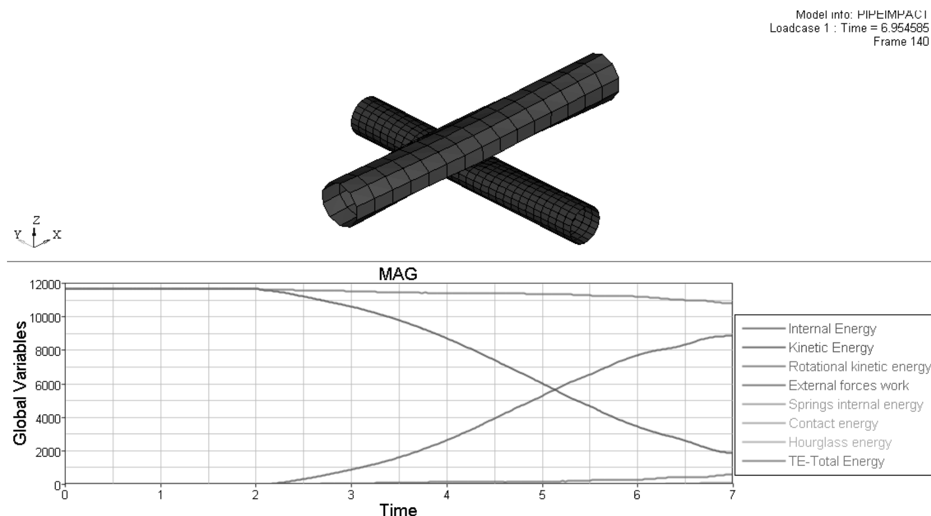


图 15−21　圆管碰撞结果查看

请读者自行完成对圆管 Shell 单元属性的更改，既可在 HM 里直接更改模型后重导出文件，也可以直接使用文本编辑工具直接修改/PROP/SHELL 卡片，并进行以下几种设置的对比计算，将各种属性卡片情况下的能量曲线画在同一张 HyperGraph 图里。关注内能、沙漏能量及接触能量的差异。同时将 0001.out 文件里的计算时间统计在一起，以进一步加深理解各种单元公式对计算结果和计算效率的影响。

（1）Ishell = 0，N = 0。

（2）Ishell = 0，N = 1。

（3）Ishell = 4，N = 5。

（4）Ishell = 12，N = 5。

（5）Ishell = 24，N = 5。

15.4.2 实例教程—齿轮对啮合冲击仿真

齿轮对是工业机械中常用的传动和变速机构，其啮合传动过程是高度非线性的冲击过程，而其开机过程（由静止至到达正常工作转速）的冲击效应尤为明显。本教程将结合这一具体工业实际问题，从网格模型开始，使用 HyperCrash 完成整个 RADIOSS Block 显式仿真模型的构建。在完成求解后，再使用不同的 Solid 单元公式进行对比计算，以了解不同的单元公式对计算结果和计算效率的实际影响。

另外，本教程完整示范了使用 HyperCrash 构建显式显式仿真模型的基本过程。

齿轮对模型如图 15−22 所示。

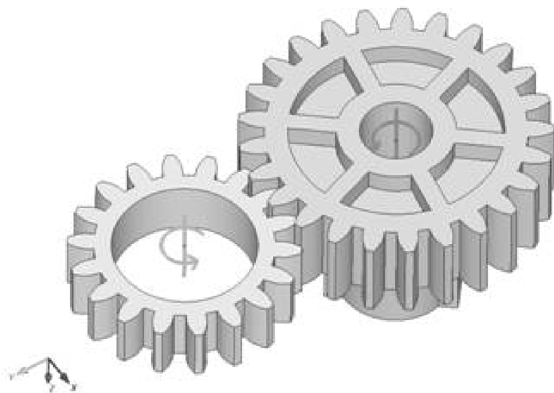


图 15−22　齿轮对模型

单位：长度（mm），时间（ms），质量（kg），力（kN），压强（GPa）。

载荷工况：大齿轮承受 0.4KNmm 的恒定扭矩，小齿轮为主动轮并在开机后 100ms 内达到稳定工作转速 2rd/s（假定是直线加速过程），此后齿轮对保持该状态稳定传动。

模型仿真时间是 150ms，即前 100ms 是加速启动过程，后 50ms 是稳定工作传动过程。

两齿轮均为同质非金属材料，本教程中简化为线弹性材料模型，密度为 2.0E−4kg/mm^3，弹性模量为 1GPa，泊松比为 0.26（注：均为虚构值）。

STEP 01　启动 HyperCrash 并导入网格模型

（1）启动 HyperCrash。

（2）Working dictory 选择网格模型文件 engage_0000.rad 所在路径，User Profile 选择 RADIOSS V10，Unit system 选择 kN mm ms kg，单击 Run，如图 15−23 所示。



图 15−23　启动 HyperCrash

（3）单击下拉菜单 File，选择 Import，单击 RADIOSS，如图 15-24 所示弹出文件选择窗口。

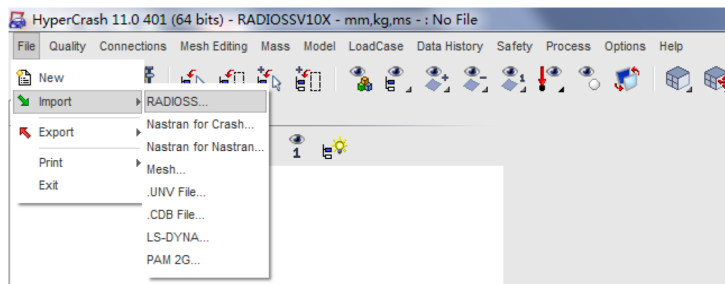


图 15-24　HyperCrash 导入 RADIOSS 模型

（4）选择文件 engage_0000.rad 后单击 OK，或者是双击文件 engage_0000.rad，则初始网格模型被导入 HyperCrash。

（5）按快捷键〈P〉，将 HyperCrash 图形区的视图切换到等轴视图。单击工具栏中的按钮，然后单击按钮，则图形区模型将以阴影网格线模式显示，按快捷键〈W〉，则图形区背景换为白色，如图 15-25 所示。

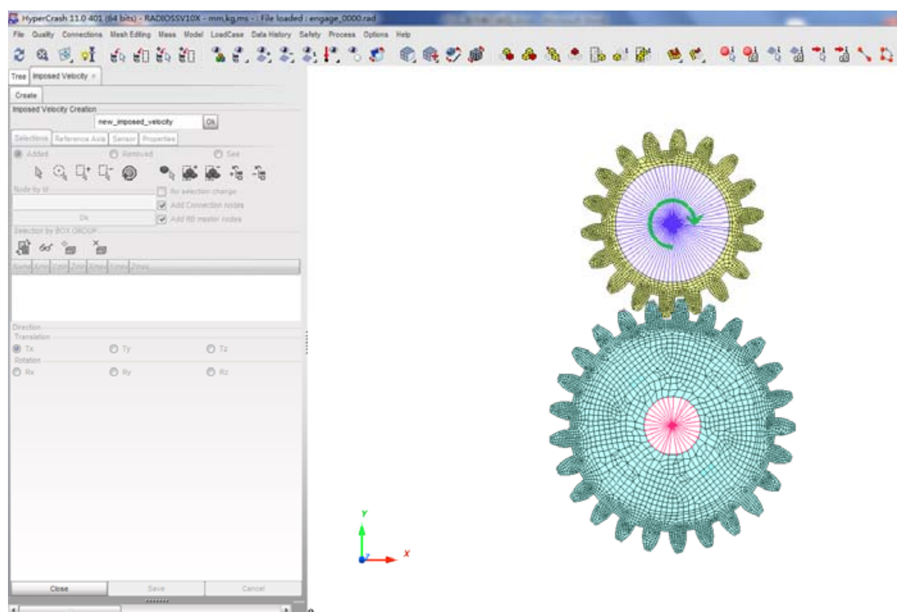


图 15-25　导入后的模型

STEP 02 创建材料卡片

（1）单击下拉菜单 Model→Material，在 Choose Material Law 里选择 Elastic→Liear Elastic（1），如图 15-26 所示，弹出材料定义面板。

（2）输入如图 15-27 所示的各参数值。

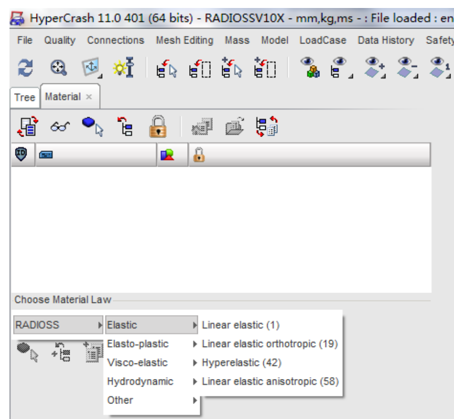


图 15-26　创建材料

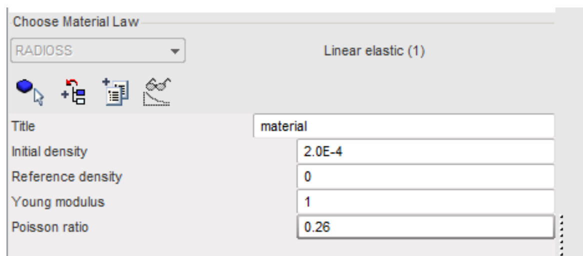


图 15-27　输入材料参数

（3）单击材料定义子面板里的按钮，则光标变为选择 PART 的方式，移动鼠标指针到图形区，依次点选两个齿轮（注意：对图形区的一个 PART 再次点选，相对于对该 PART 取消选择），按〈Enter〉键（或者单击图形区右下角的 Yse 按钮）。这时，能看到图形区里两个齿轮都变成红色（被选中提示）。

（4）单击材料定义子面板下部的 Save 按钮，则此材料在被成功创建的同时，已经赋给两个齿轮。在 Material 页面的列表里可以看到刚刚创建的材料 material，如图 15-28 所示。

STEP 03 创建属性卡片

（1）单击下拉菜单 Model→Property，在 choose Property Law 里选择 Volume→General solid（14），如图 15-29 所示，弹出 Shell 属性定义面板。

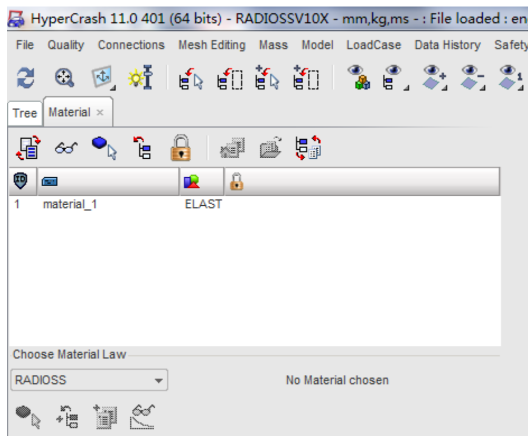


图 15-28　Material 列表

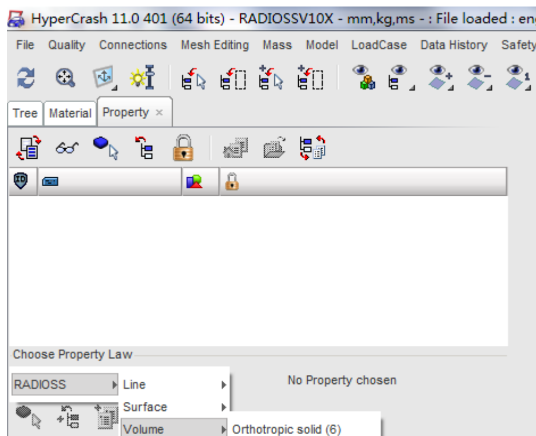


图 15-29　创建属性

（2）输入 Title 为 case_solid24，单击 Solid element formulation 栏右部的黑色下拉箭头，切换成 HEPE 8 node solid，co-rotational，1Gausss point with physical stablization，其余选项保持默认状态，如图 15-30 所示。

（3）单击属性定义子面板里的 按钮，则光标变为选择 PART 的方式，移动鼠标指针到图形区，依次点选两个齿轮（注意：对图形区的一个 PART 再次点选，相对于对该 PART 取消选择），按〈Enter〉键（或者单击图形区右下角的 Yse 按钮）。这时，能看到图形区里两个齿轮都变成红色（被选中提示）。

单击属性定义子面板下部的 Save 按钮，则此属性在被成功创建的同时，已经赋给两个齿轮。在 Property 页面的列表里可以看到刚刚创建的属性 case_solid24，如图 15-31 所示。

STEP 04 创建齿轮轴刚体

（1）依次单击 Propperty 子页面和 Material 子页面下部的 Close 按钮，关闭这两个页面。

（2）单击下拉菜单 Mesh Editing→Rigid body→Create，如图 15-32 所示。

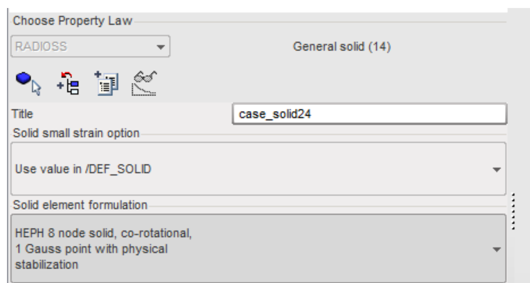


图 15-30 定义属性卡片

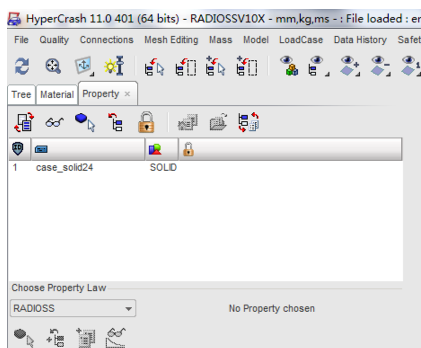


图 15-31 Propperty 列表

（3）接受 Rigid body creation 面板默认的刚体的 title（new_rigid_body），单击 OK，弹出刚体创建界面的 selection 子页面。

（4）使用鼠标左键在图形区空白处单击一下，然后按快捷键〈F9〉（或者单击 按钮后选择 XY 视图）切换图形区到顶视图。

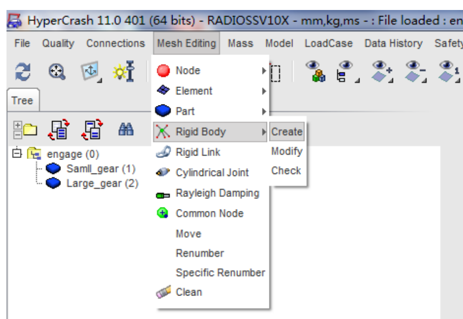


图 15-32 进入创建刚体界面

（5）使用〈Ctrl+鼠标滚轮〉缩放图形区，并结合〈Ctrl+鼠标右键〉平移，使图形区里小齿轮处于图形区中央。单击左侧节点选取工具里圆形选择工具 后，在图形区里小齿轮内壁一圈节点与向外一层节单击之间的位置单击一下鼠标左键，按住左键在图形区里拖拽，将内壁一圈节点全部框住后松开，则内壁一圈节点都被选中。最终选择的节点将以红色高亮显示，如图 15-33 所示。

（6）将 selection 子页面切换到 Master node 子页面，输入 X = 0，Y = 17.2，Z = −5 后单击 XYZ 坐标输入栏里的 Save 按钮。

（7）将 Master node 子页面切换到 Properties 子页面，选中 Time history 栏的 Master node 和 Rigid body，将 Center of gravity flag 选项切换成 mast. fixed，mass & inertia on COG:3，如图 15-34 所示。

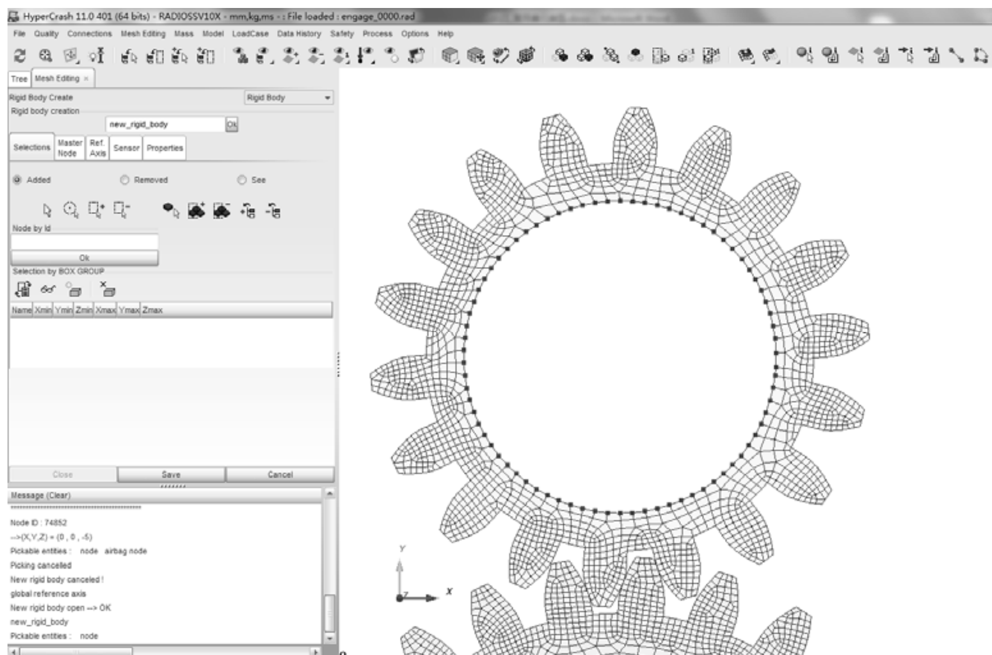


图 15–33　选择小齿轮内壁节点

（8）单击 Mesh Editing 页面下部的 Save 按钮，完成小齿轮中心的刚体创建。

（9）重复上述步骤（3）～（8）创建大齿轮的中心的刚体，其 Master node 的坐标输入 X = 0，Y = 0，Z = −5。创建完成后，单击 Mesh Editing 面板的下部的 close，返回主界面。

注意：HyperCrash 默认是不在图形区显示刚体的，如果要显示刚体，可以按快捷键〈F6〉或者单击按钮，找到刚体按钮，将其显示打开。

STEP 05 施加约束条件

（1）单击下拉菜单 Loadcase→Boundary condition→Create，进入边界条件创建界面。

（2）单击 OK，接受默认的 Title。

（3）按快捷键〈F6〉，显示出两个刚体。

（4）在 Selection 子页面里，使用圆形选择工具将图形区里小齿轮中心刚体的主节点选中。

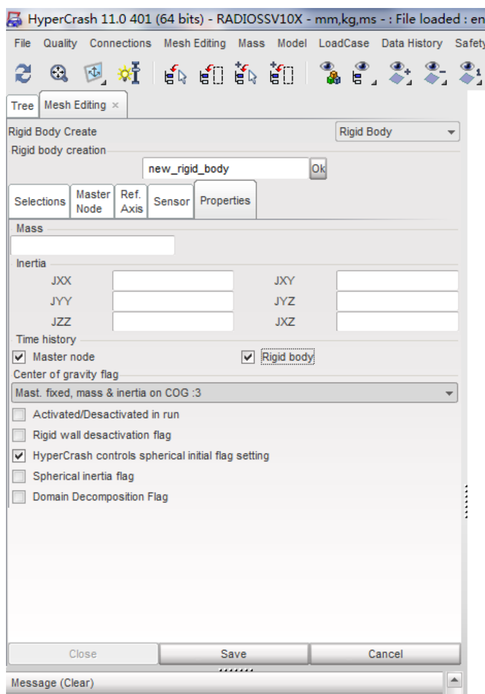


图 15–34　切换选项

（5）将子页面 Selection 切换到 Reference Axis 子页面，选择 Moving Local，我们将创建一个随动的局部坐标系。

（6）按快捷键〈F8〉，可看到图形区在大小齿轮的旁边有两个悬空的节点（它们与两个

齿轮中心的刚体主节点在一个法向为 Z 向的平面内）。

（7）依次选中小齿轮中心刚体主节点、大齿轮中心刚体主节点、与该悬空的辅助节点，则小齿轮中心出现一个局部坐标系的预览，如图 15-35 所示。

（8）Reference Axis 子页面的 Local Reference Axis Name 自动出现该坐标系的名称，接受该默认名称，单击 see 按钮旁边的 Save（注意不是左侧最下部的 Save 按钮），以保存该坐标系。

（9）勾选约束自由度分量 Tx，Ty，Tz，Rx，Ry，单击最下部的 Save 按钮，以完成对小齿轮中心刚体的边界条件施加。

（10）重复上述步骤（2）～（9），创建大齿轮中心的局部坐标系和刚体自由度约束。其中创建大齿轮局部坐标系时，选择节点的顺序应为大齿轮中心刚体主节点、与该悬空的辅助节点、小齿轮中心刚体主节点，约束的自由度是 Tx，Ty，Tz，Rx，Ry。

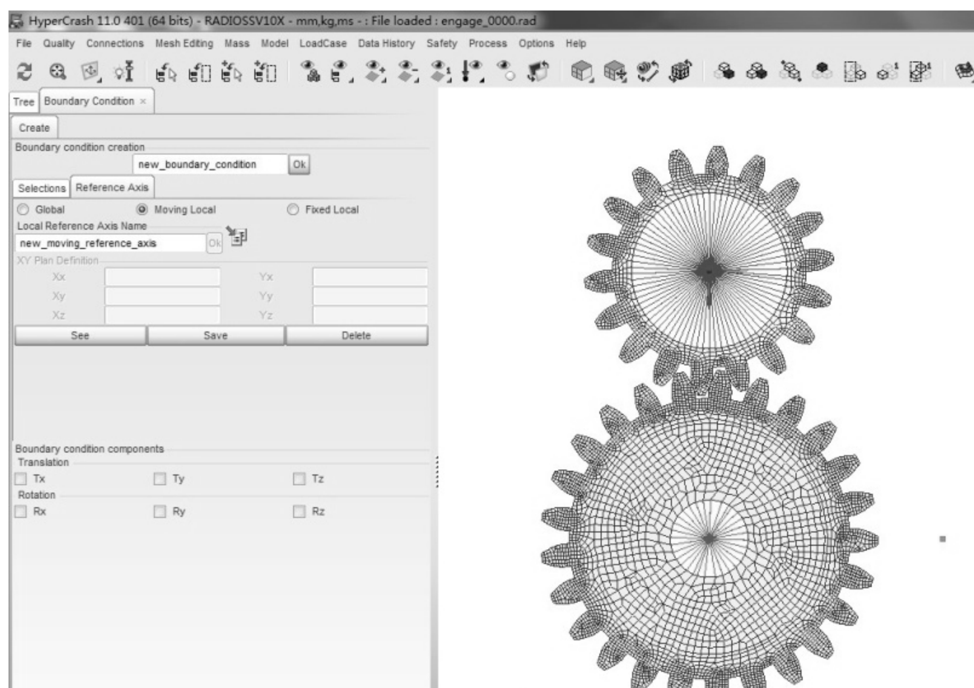


图 15-35　创建小齿轮中心局部坐标系

（11）创建完成后，单击左下角的 Close 按钮，退出边界条件施加界面。

STEP 06 施加转速条件

（1）单击下拉菜单 Loadcase→Imposed velocity→Create，进入强制速度创建界面。

（2）单击 OK 按钮，接受默认的 Title。

（3）在自动弹出的曲线定义窗口里输入 Fuction Name 为 Rot_4Pi_Sec，在 t-f(t)栏里依次输入（0, 0），（100，0.012566370614），（200，0.012566370614）。在每组点对输入后单击 Validate 按钮才可以输入下一组点对。输入完成后，单击 Function window 的 Save 按钮，保

存该曲线，如图 15–36 所示。

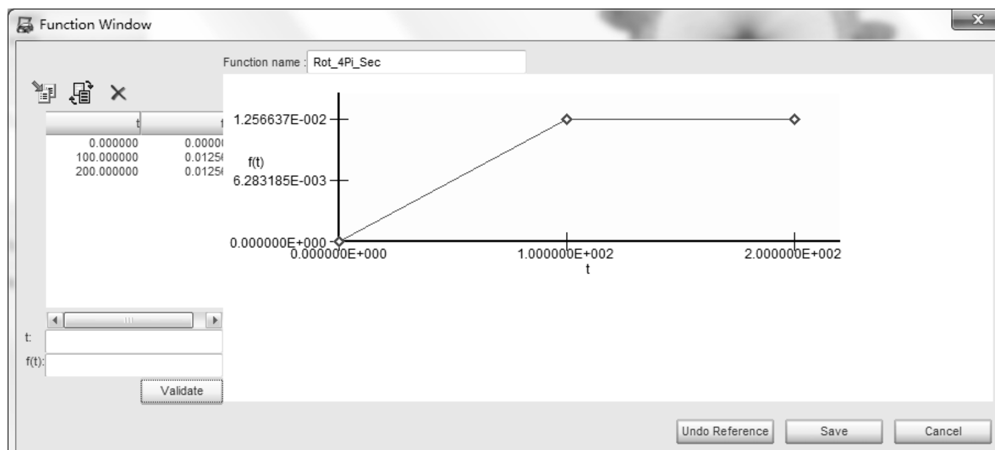


图 15–36　创建主动轮转速曲线

（4）在 Imposed velocity 面板的 Selection 子页面上，单击圆形选择工具，拖住鼠标左键选择小齿轮中心刚体的主节点。

（5）将 Selection 子页面切换成 Reference Axis 子页面，选择 Moving local 选项，按〈Esc〉键取消 HyperCrash 默认弹出的新创建坐标系界面。

（6）单击“导入”按钮，在弹出的 Local Axis file 窗口里单击之前施加边界条件时创建的局部坐标系 new_moving_reference_axis; id :1; Type:MOV，如图 15–37 所示。

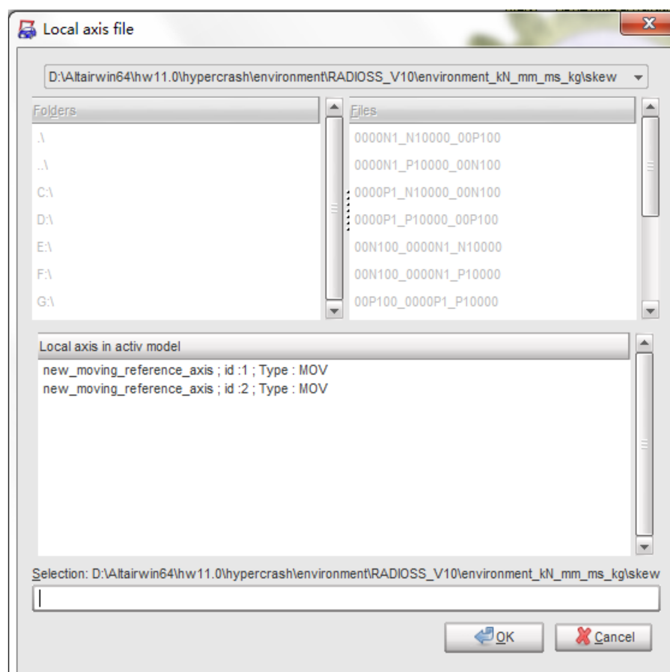


图 15–37　选择施加转速的局部坐标系

（7）单击 Reference Axis 子页面中部的 Save 按钮，以保存局部坐标系的选择。勾选 Direction 下面的 RZ。

（8）单击 Reference Axis 子页面下部的 Save 按钮，完成并保存强制转速的施加。图形区的小齿轮中心将会出现转速的绿色标记，如图 15-38 所示，单击 Close 按钮，退出速度施加面板。

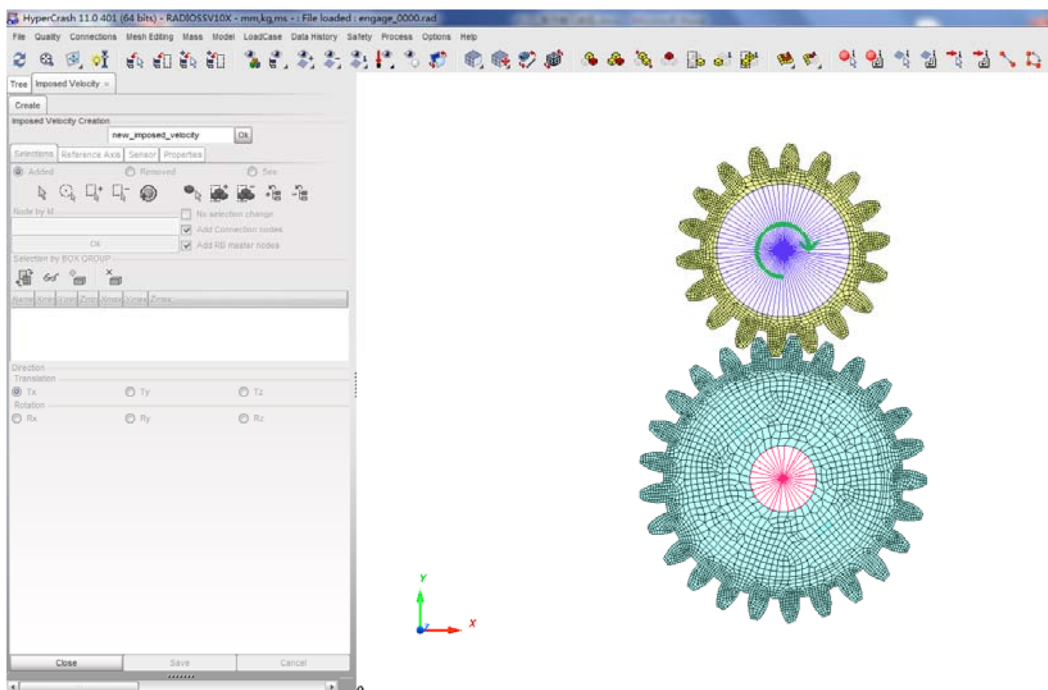


图 15-38 施加的强制转速

STEP 07 施加扭矩

（1）单击下拉菜单 Loadcase→Concentrated load，进入集中载荷界面。

（2）单击按钮，弹出集中载荷创建界面。在 Title 栏中输入 M_0.4KNmm，将 Direction 选项切换为 33：ZZ（moment），使用圆形选择工具选择大齿轮中心刚体的主节点。使用鼠标右键单击 Moment 栏中的 None，选择 Define function，如图 15-39 所示。

（3）在弹出曲线定义窗口里，按 Step06 之（3），定义扭矩大小与时间曲线。其中，Function Name 为 M_0.4KNmm，数据点对分别是（0，0.4）和（200，0.4）。

（4）在返回的 CLOAD 窗口里，单击 Skew 行，看到完整的坐标系指定界面。选择 Moving local 选项，按〈Esc〉键取消 HyperCrash 默认弹出的新创建坐标系界面。单击“导入”按钮，在弹出的 Local Axis file 窗口里单击之前施加边界条件时创建的局部坐标系 new_moving_reference_axis; id :2; Type:MOV。

（5）单击按钮下部的 Save 按钮，以保存局部坐标系的选择。

（6）单击 Concentrated Load 面板最下部的 Save 按钮，完成并保存扭矩载荷的施加。图

形区的大齿轮中心将会出现扭矩的橙色标记，如图 15-40 所示，单击 Close 按钮，退出速度施加面板。

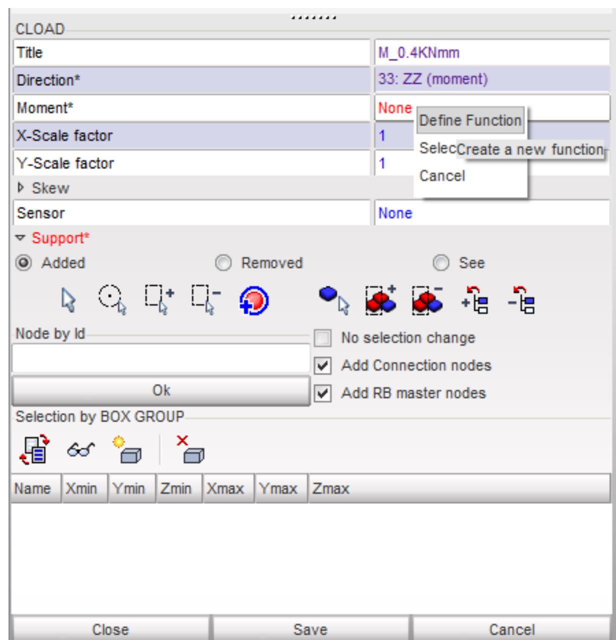


图 15-39　创建扭矩载荷

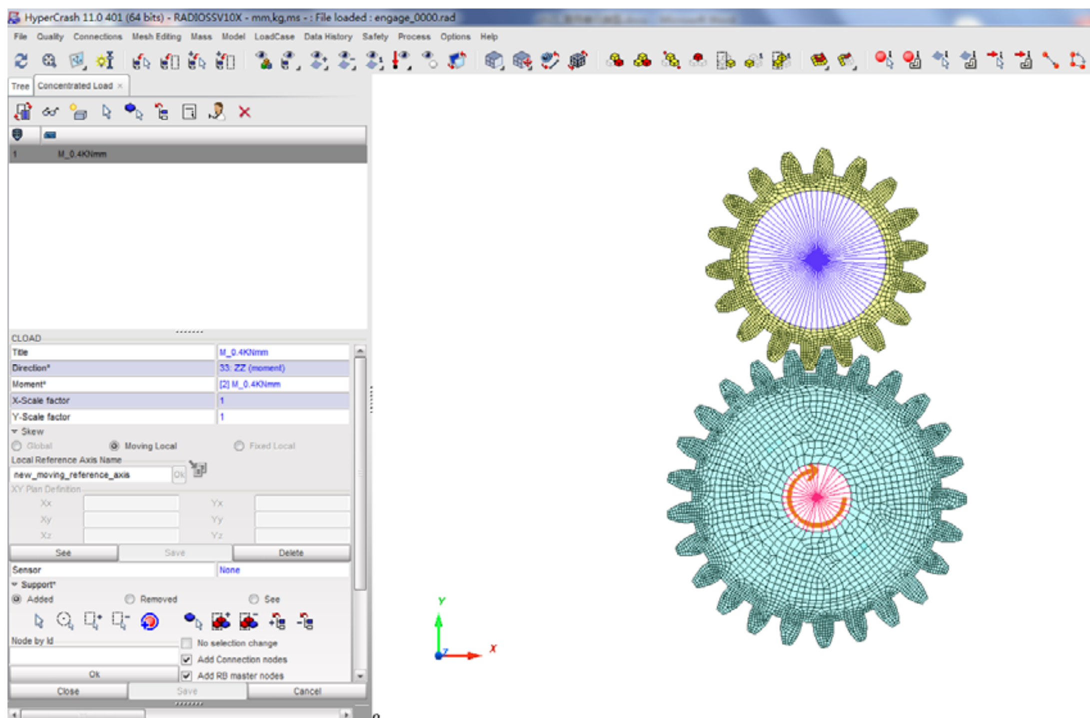


图 15-40　施加的扭矩

STEP 08 定义接触

（1）单击下拉菜单 Loadcase→Contact Interface，进入接触设置界面。

（2）单击按钮，选择 Multi usage（Type 7），进入 Interface Type 7 的创建界面。

（3）在 Type 7 的定义界面里，勾选 self Impact，Stiffness definition 选择 4，Min. gap for impact activ. 项输入 0.1，Stiffness deactive.（ini. penetration）栏选择 5，Coulomb friction 输入 0.15，Friction penatly formulation 栏选择 2。

（4）在 Master surface 区单击 PART 点选工具，将大小两个齿轮都选中，单击 Contact Interface 面板最下方中部的 Save 按钮，再单击 Close 按钮，如图 15-41 所示。至此，完成了两个齿轮的接触定义。

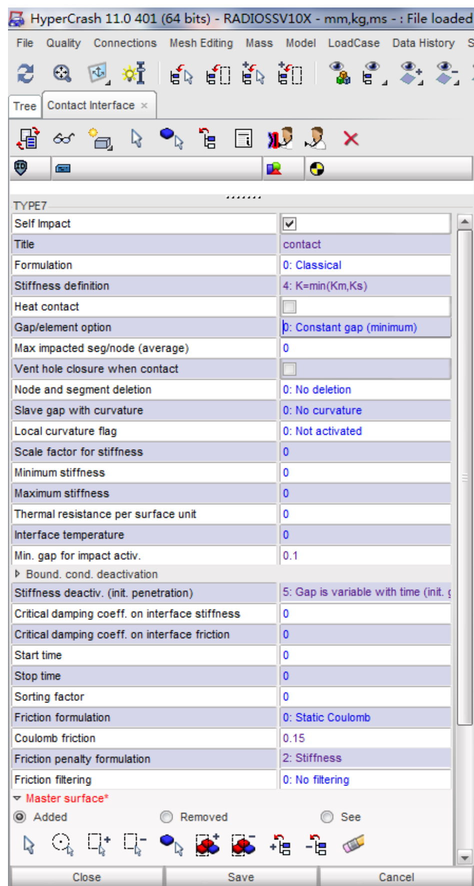


图 15-41　设置 Type 7 的参数

STEP 09 导出模型文件

（1）单击下拉菜单 File→Export→RADIOSS，弹出写出模型文件界面。

（2）在选择文件栏里，输入 engage_case24，单击 OK 按钮。

（3）弹出注释头提示，接受默认添加的注释，单击 Save model 按钮。

（4）在弹出的 Write EngineFile 窗口里，在 Generalities 子页面的 Title 文本框中输入：Gear pair starting，Final time：2.000100ef002，Mininum time step：1.500000e-003，如图 15-42 所示。

（5）切换到 Anim 子页面，添加勾选 Energy 和 Von Mises stress 后，单击 Write Engine File 按钮，完成 Engine 的文件定义和写出。

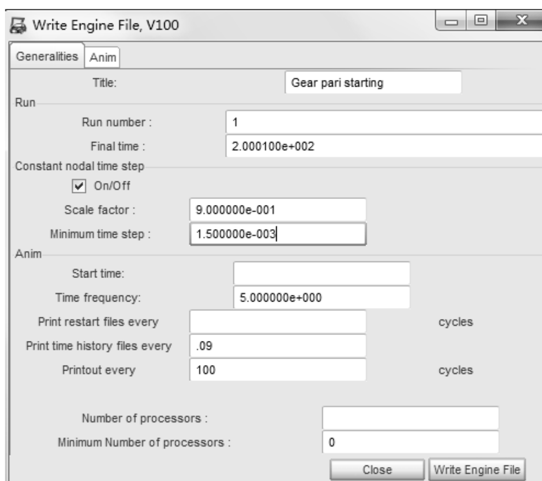


图 15-42　Engine 文件定义

STEP 10 求解模型并查看结果

（1）单击系统“开始”菜单 Start→

Programs→Altair HyperWorks 11.0→RADIOSS。

（2）在 Input file 中浏览并选择 engage_case24_0000.rad，在 options 栏里输入−both，单击 Run 开始求解。

（3）带求解完成后，使用 HyperView 打开结果动画和时间历程曲线，查看接触力云图及总接触合力时间历程曲线，如图 15−43 所示。

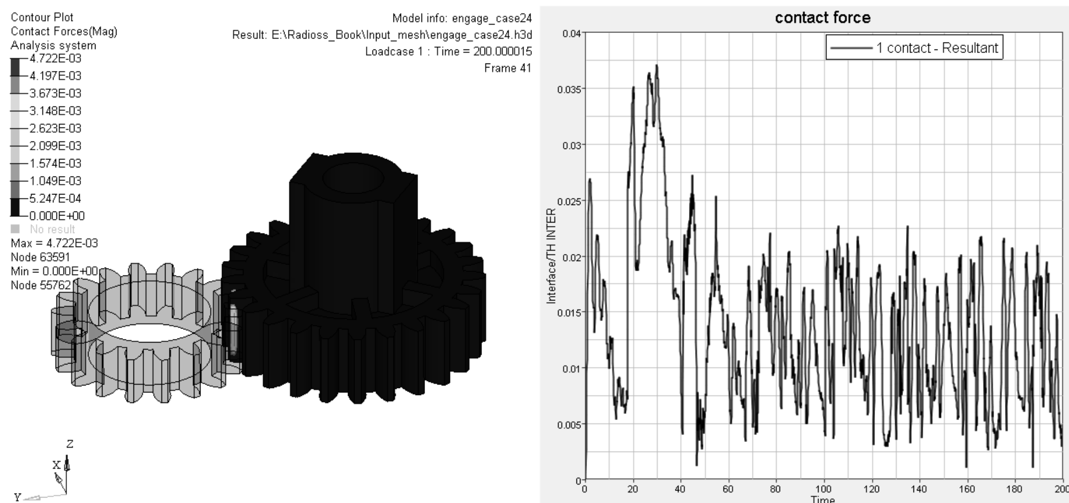


图 15−43　接触力云图及时间历程曲线

请读者自行完成两个齿轮 Solid 单元属性的更改，可在 HyperCrash 里更改模型后重导出文件，但是建议使用文本编辑工具直接修改/PROP/SOLID 卡片，并进行如下 3 种设置的对比计算，将总共 4 次计算的能量曲线及接触力曲线分别画在同一张 HyperGraph 图里，关注内能、沙漏能量、接触能量以及接触力的差异。同时将 0001.out 文件里的计算时间统计在一起，以进一步加深理解各种单元公式对计算结果和计算效率的影响。

（1）Isolid = 0, N = 0。

（2）Isolid = 12, N = 0。

（3）Isolid = 14, ijk = 222。

15.4.3 实例教程—手机跌落模拟

本教程从一个已有的网格模型开始，建立了一个简化的手机跌落的仿真模型。为了平衡计算精度和计算效率，简化的手机机体两个零件均使用了 RADIOSS 独有的 4 节点二阶四面体单元，并在两者之间定义弹簧单元 Spring Type13 连接来近似安装关系，两个零件之间定义了接触。

本教程要点是 4 节点二阶四面体单元算法及 Spring Type13 的定义与单元创建，模型如图 15−44 所示。

模型单位：长度（mm），时间（s），质量（ton），集中力（N）和应力（MPa），模拟时间：在 Engine 中 [0 – 3.3e−3]，为了减少模拟时间，手机从距离地面 1 mm 跌落，初始速度

为−4 429.446 9 mm/s，等效于从 1 000 mm 跌落。手机部件的材料使用了 LAW36（Plastic），其数据如下：

ρ = 1.16E−9ton/mm　　[Rho_I] 初始密度
υ = 0.3　　[nu] 泊松比
E = 1000　Mpa　　[E] 杨氏模量

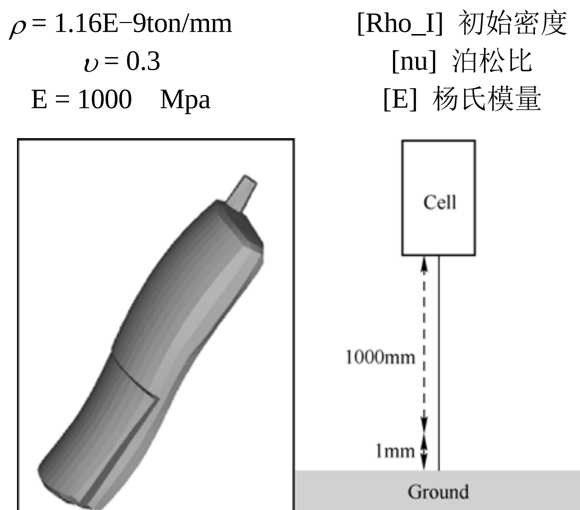


图 15−44　手机跌落

其真实应力−塑性应变曲线为

STRAIN	0	16
STRESS	1	17

STEP 01 载入 RADIOSS（Block）用户配置

（1）启动 HyperMesh。
（2）从 Preferences 菜单中选择 User Profiles 或在工具栏中单击按钮。
（3）选择 RADIOSS（Block100）并单击 OK 按钮。

STEP 02 载入网格模型文件 Cell_phone.hm

（1）在工具栏中单击 Open Model 按钮，并浏览至目标文件夹，选择 cell_phone.hm 文件。
（2）单击 Open 按钮，模型被载入至图形区域。

STEP 03 创建材料曲线

（1）从 XYPlots 下拉菜单中，单击 Curve Editor。
（2）在 Curve editor 窗口中，单击 New。
（3）在 curve name 中输入 stress_strain_curve。

（4）单击 proceed。

（5）在 Curve editor 窗口中，从 Curve List 中选择 stress_strain_curve。

（6）输入 X 和 Y 坐标，如图 15-45 所示。

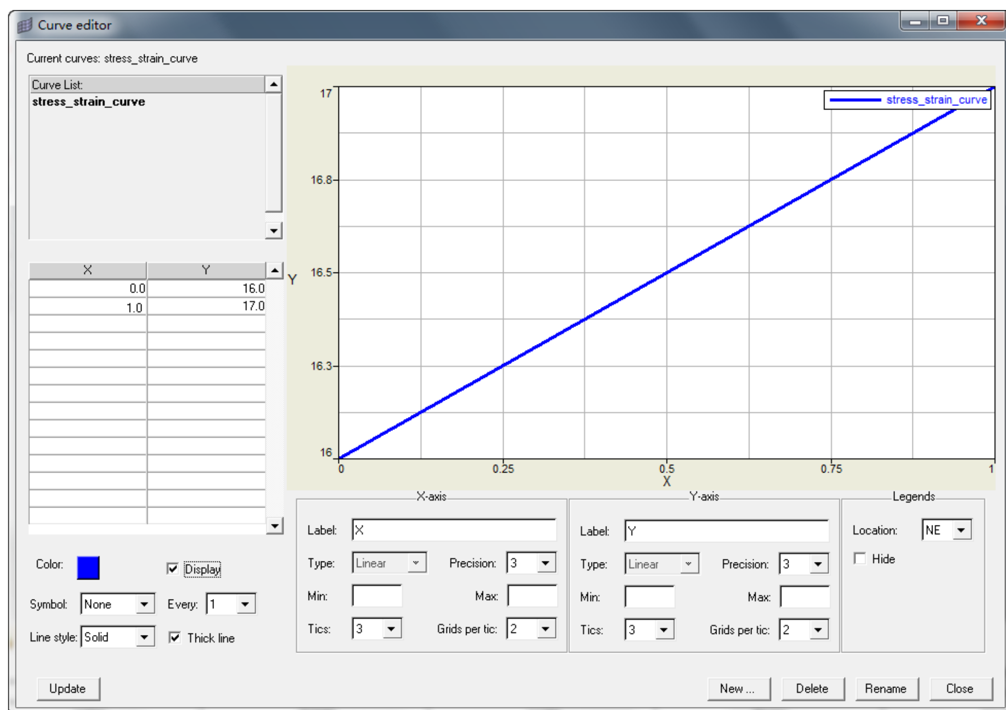


图 15-45 创建材料曲线

（7）单击 Update→Close。

STEP 04 定义并指定材料和属性给手机零件

（1）从 Model Browser 中选择 Cellphone_Bottom 和 Cellphone_Top，然后单击鼠标右键选择 Edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Material 标签创建材料。

（4）确认选中 Assign material。

（5）在 name 中输入 cell_phone。

（6）在 type 中选择 ELASTO_PLASTIC；在 card image 中选择 M36PLAS_TAB。

（7）单击 Create Material。

（8）输入以下值：

Density = 1.16e-9，Young’s Modulus = 1000，Poisson’s ratio = 0.3，如图 15-46 所示。

（9）选择 N_func 并设置为 1。

（10）单击 I_func1 并选择 stress_strain_curve（之前创建的曲线）。



图 15-46　定义 cell_phone 材料

（11）单击 return 两次返回至 component 对话框。

（12）单击 Property 标签创建属性。

（13）确认选中 Assign property。

（14）在 name 中输入 cell_phone；在 type 中选择 VOLUME。

（15）在 card image 中选择 P14_SOLID 并单击 Create Property。

（16）在 card image 中，设置 Irot 为 1。

（17）单击 return 返回。

（18）单击 update 更新零件。

STEP 05 定义并指定属性给弹簧连接

（1）从 Model Browser 中选择零件 connection_spring，然后单击鼠标右键选择 Edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Property 标签创建属性。

（4）确认选中 Assign property。

（5）在 name 中输入 spring。

（6）设置 type 为 LIN，并设置 card image 为 P13_SPR_BEAM.

（7）单击 Create Property。

（8）输入以下值（注意使用左侧滚动条）：

Mass（MASS）：2e−6 ton，Inertia（Inertia）：2e−4 mm4，Translation stiffness（K_Ten, K_ShrY, K_ShrZ）：50，Rotation stiffness（K_Tor, K_FlxY, K_FlsZ）：1000N，如图 15-47 所示。

（9）单击 return 两次返回至 component 面板。

（10）单击 update 更新零件。

STEP 06 定义手机零件之间的接触

（1）在 Analysis 页面进入 interfaces 面板，create 子面板或者在 Tools 下拉菜单中选择

create cards→INTER→TYPE7。

Id
/PROP/SPR_BEAM/ 2

spring

[MASS] 2.000e-06 [Inertia] 2.000e-04 [Iskew] [Isensor] [Isflag] [Ifail]
[K_Tensn] 50.000 [C_Tensn] [A_Tensn] [B_Tensn]
[func_ID1_Tensn] [H_Tensn] [funcID2_Tensn] [funcID3_Tensn] [DeltaMin_Tensn]
[Scale_F_Tensn] [Coeff_E_Tensn] [Scale_x_Tensn]
[K_ShrY] 50.000 [C_ShrY] [A_ShrY] [B_ShrY]
[func_ID1_ShrY] [H_ShrY] [func_ID2_ShrY] [func_ID3_ShrY] [DeltaMin_ShrY]
[F_shrY] [E_shrY] [Scale_shrY]
[K_ShrZ] 50.000 [C_ShrZ] [A_ShrZ] [B_ShrZ]
[func_ID1_ShrZ] [H_ShrZ] [func_ID2_ShrZ] [func_ID3_ShrZ] [DeltaMin_ShrZ]
[F_shrZ] [E_shrZ] [Scale_shrZ]
[K_Tor] 1000.000 [C_Tor] [A_Tor] [B_Tor]
[N1_Tor] [H_Tor] [N2_Tor] [N3_Tor] [ThetaMin_Tor]
[F_Tor] [E_Tor] [Scale_x_Tor]
[K_FlxY] 1000.000 [C_FlxY] [A_FlxY] [B_FlxY]
[funcID1_FlxY] [H_FlxY] [funcID2_FlxY] [func_ID3_FlxY] [ThetaMin_FlxY]
[F_FlxY] [E_FlxY] [scale_FlxY]
[K_FlxZ] 1000.000 [C_FlxZ] [A_FlxZ] [B_FlxZ]
[funcID1_FlxZ] [H_FlxZ] [funcID2_FlxZ] [funcID3_FlxZ] [ThetaMin_FlxZ]
[F_FlxZ] [E_FlxZ] [Scale_FlxZ]

User Comments
Hide In Menu/Export
RADIOSS_COMMENT_FLAG
reject
default
abort
return

图 15-47 定义 Spring Type13 的属性值

（2）在 name = 中输入 self。

（3）设置 type = 为 TYPE7。

（4）单击 create/edit。

（5）在 FRIC 中输入 0.1；在 GAPmin 中输入 0.3。

（6）单击 return。

（7）选择 add 子面板。

（8）设置 master 为 set，并单击 edit 创建主曲面。

（9）在 name = 中输入 Cell_Bottom。

（10）设置 card image = 为 SURF_EXT。

（11）单击 comps 并选择 Cell_Bottom。

（12）单击 proceed→create。

（13）单击 return 返回。

（14）单击 sets 并选择 Cell_Bottom。

（15）单击 Update。
（16）设置 slave 为 comps。
（17）单击 comps 并选择 Cell_Top。
（18）单击 Update。
（19）单击 review 确认接触是否定义正确。
（20）单击 return 返回。

STEP 07 创建一个刚体墙壁

（1）在 Analysis 页面中进入 rigid walls 面板。
（2）在 name = 中输入 GROUND。
（3）设置 type = 为 RWALL。
（4）设置 card image = 为 RWALL。
（5）单击 create/edit。
（6）单击 return 返回。
（7）按〈F8〉键，输入节点坐标：X = 0, Y = 0, Z = 19。
（8）单击 create node。
（9）单击 return 返回。
（10）进入 geom 子面板。
（11）选择创建的节点作为 base node。
（12）确认 normal vector 设置为 z-axis，如图 15-48 所示。



图 15-48　定义刚性墙

（13）设置 shape 为 infinite plane。
（14）单击 update。
（15）进入 add 子面板。
（16）在 dist = 中输入 50。
（17）单击蓝色的 review 按钮确认 ground 是否定义正确，如图 15-49 所示。
（18）单击 return 返回。

STEP 08 定义重力载荷

（1）从 Utility 页面中启动 BC’s Manager。
（2）在 Name 中输入 Gravity，设置 Select type 为 Gravity Load，并设置 GRNOD 为

Parts。

（3）选择全部的 3 个零件。

（4）设置 Direction 为 Z。

（5）设置 Scale Y 为−9 810.0，表明重力为 *Z* 轴反方向，如图 15−50 所示。

（6）单击 create/select 设置为 XY curve editor。

（7）在 Curve editor 窗口，单击 New。

（8）在 name = 中输入 gravity。

（9）单击 proceed。

（10）在 Curve editor 窗口，从 Curve List 中选择 gravity。

（11）输入 x 和 y，如图 15−51 所示。

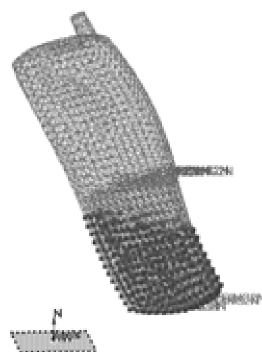


图 15−49 预览刚性墙的定义

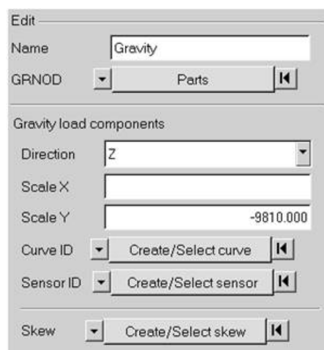


图 15−50 定义重力

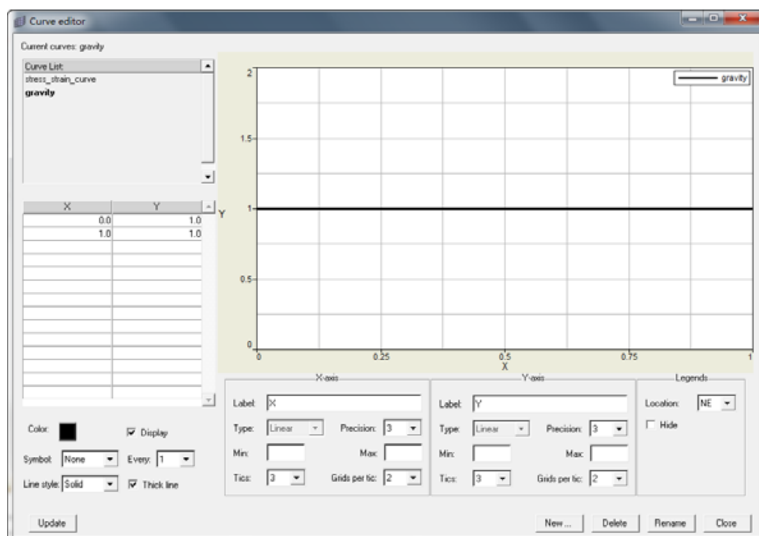


图 15−51 定义重力因子曲线

（12）单击 Update→Close 关闭 Curve editor 窗口。

（13）单击 create 创建重力载荷。

STEP 09 为 Cell Phone 加载初始速度

（1）在 BC’s Manager，输入 Name 为 Initial_velocity，设置 Select type 为 Initial Velocity 并设置 GRNOD 为 Parts。

（2）选择全部的 3 个零件。

（3）在 Vz = 中输入−4 429.446 9，如图 15−52 所示。

（4）单击 create 创建初始速度。

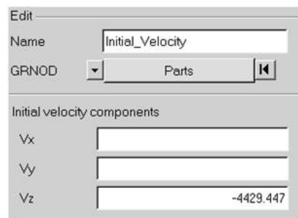


图 15−52 定义速度

STEP 10 创建输出请求和控制卡片

（1）在 Utility 菜单中，选择 RADIOSS Tools，然后选择 Engine File。

（2）弹出 RADIOSS Engine File Tool 窗口。

（3）在 GENERAL，ANIM 和 DT 窗口中输入如图 15-53 所示的值。

图 15-53　定义 Engine 卡片

（4）单击 Apply→Close。

STEP 11 选择控制卡片

（1）从 Analysis 页面中进入 control cards 面板，激活 MemoryReq 控制卡片。

（2）单击 MemoryReq 卡片，输入 NMOTS = 40 000。

（3）单击 return 两次退出当前面板。

STEP 12 导出模型

（1）从 File 下拉菜单中，单击 Export 或者单击 Export 按钮（对于 standalone）或（对于 HyperWorks Desktop）。

（2）对于 File，单击“文件夹”按钮（对于 standalone）或者（对于 HyperWorks Desktop）并浏览至想要放置的文件夹。

（3）在 name 中输入 Cellphone，并单击 Save。

（4）单击 Export options 旁的向下箭头展开面板。

（5）单击 Merge starter and engine file 以导出一个整体的求解文件。

（6）单击 Export 导出求解文件。

STEP 13 求解模型

（1）单击 Start→Programs→Altair HyperWorks 11.0→RADIOSS。

（2）对于 Input file，浏览至之前的文件夹并选择文件 cellphone_0000.rad。

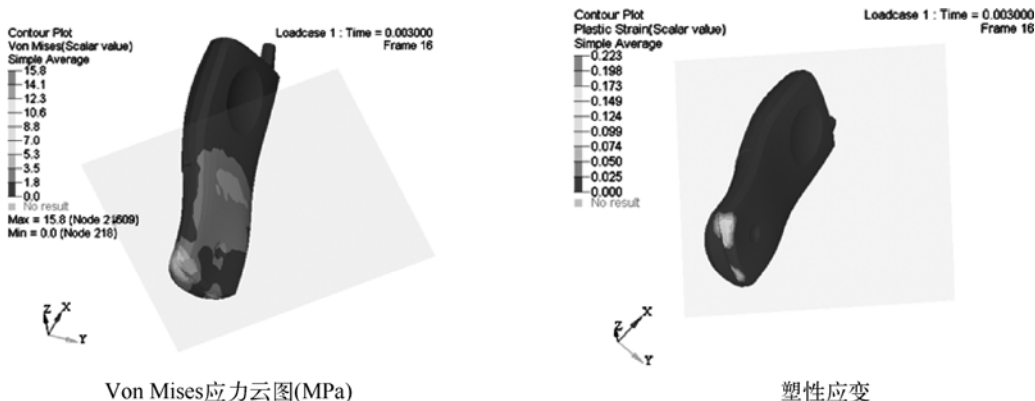
（3）在 Options 栏里输入 −both，单击 Run。

STEP 14 查看输出文件并检查结果

（1）查看.out 文件中是否有任何警告或错误。

（2）使用 HyperView 绘制应力应变云图。

（3）最终在 HyperView 里查看的结果如图 15−54 所示。



Von Mises应力云图(MPa)　　塑性应变

图 15−54　结果查看

15.5　本章小结

本章介绍了工程有限元基本假设，RADIOSS block 各种常用 1D、2D、3D 单元的基本定义、时间步长、使用要点以及属性卡片详细解释。对经典的 Spring Tyep 13 列举了其推广应用的示例。Shell 单元的介绍中还概括了各种 Shell 单元公式的优、缺点和使用建议。本章的实例教程部分展示了使用 HyperMesh 和 HyperCrash 进行 RADIOSS Block 建模的完整过程。在实例教程的讨论部分，读者按照提示进行再研究，可以更好地理解掌握各种单元公式的特点。本章的实例中还涉及多步分析等，也值得读者认真体会。

第 16 章

材料与失效模型



选择适当的材料（本构）模型和使用正确的材料参数是有限元仿真建模最重要也是最困难的部分之一，对于碰撞与冲击等瞬态动力学问题尤是如此。除了传统的弹性、弹塑性、硬化和基于应变率的材料本构模型以外，RADIOSS Block 中还支持以下特殊的材料本构模型：泡沫、织物、土壤、混凝土、复合材料、岩石、蜂窝结构和生物材料。

本章重点知识

16.1　RADIOSS Block 材料模型及其选用
16.2　常用材料模型
16.3　RADIOSS Block 失效模型概述
16.4　常用失效模型
16.5　工程结构常用材料的建模
16.6　RADIOSS Block 材料与失效模型应用实例
16.7　本章小结

在 RADIOSS Block 里，失效模型作为单独的模型要素，独立于材料模型之外（部分材料模型已经自带失效模型及其参数定义域）。对于给定的某种材料，可以同时指定不同的失效模型，这为精确模拟材料的失效破坏提供了可能。同时，RADIOSS Block 里还包含大量独创性的高级失效模型。

秉承一贯的开放理念，RADIOSS Block 还同时提供用户接口，以方便特殊专业和领域用户使用自定义材料模型和自定义失效模型。

本章在对 RADIOSS Block 里的材料模型和失效模型进行简要介绍后，对工程结构常用材料模型和失效模型进行了介绍，并对常用材料（金属合金、玻璃、泡沫与橡胶、蜂窝材料、复合材料等）的建模给出了一般性建议。

16.1　RADIOSS Block 材料模型及其选用

按照材料类型，可将 RADIOSS Block 中涉及结构力学的常见材料模型按力学性质分为如下几类：各向同性弹性材料、复合材料与各向异性材料、弹塑性各向同性材料、粘性材料、液体动力学材料、多物质多相材料、爆炸物、空材料等，表 16-1 对它们进行了简要描述。

另外，RADIOSS Block 在 CFD 和 ALE 领域的专用材料，将在本书的流固耦合相关章节用到。

表 16-1　RADIOSS Block 结构力学材料概览

类　型	描　述	模　型	LAW No.
各向同性弹性材料	Linear elastic	Hooke	(1)
	Hyper-elastic	Ogden, Mooney-Rivlin	(42)
		Tabulated Input for Hyper-elastic	(69)
	Material	Ogden material	(82)
复合材料与各向异性材料	Linear elastic for orthotropic shells	Fabric	(19)
	Non-linear elastic for anisotropic shells	Fabric	(58)
	Non-linear pseudo-plastic orthotropic solids without strain rate effect	Honeycomb	(28)
		Cosserat Medium	(68)
		Thermal Hill Orthotropic	(73)
		Thermal Hill Orthotropic 3D	(74)
	Non-linear pseudo-plastic orthotropic solids with strain rate effect	Crushable foam	(50)
	Elasto-plastic anisotropic shells	Hill	(32)
		Hill (tabulated)	(43)
		Three-Parameter Barlat	(57)
		Anisotropic Hill	(72)

（续）

类　　型	描　　述	模　　型	LAW No.
复合材料与各向异性材料	Elasto-plastic orthotropic composites	Tsai-Wu Formula for Solid	(12)
		Composite Solid	(14)
		Composite Shell Chang-Chang	(15)
		Composite Shell	(25)
		Foam model	(53)
弹塑性各向同性材料	von Mises hardening without damage	Johnson-Cook	(2)
		Zerilli-Armstrong	(2)
		Drücker-Prager for rock or concrete by polynomial	(10)
		Rigid material	(13)
		Drücker-Prager for rock or concrete by function	(21)
		Tabulated piecewise linear	(36)
		Cowper-Symonds	(44)
		Zhao	(48)
		Connection material	(59)
		Tabulated quadratic in strain rate	(60)
		Hansel model	(63)
		Ugine and Alz approach	(64)
		Elastomer	(65)
	von Mises hardening with brittle damage	Reinforced concrete	(24)
		Aluminum, glass, etc.	(27)
		Predit rivets	(54)
	von Mises hardening with ductile damage	Ductile damage for solids and shells	(22)
		Ductile damage for solids	(23)
	von Mises with visco-plastic flow	Ductile damage for porous materials, Gurson	(52)
粘性材料	Visco-elastic	Boltzmann	(34)
		Generalized Kelvin-Voigt	(35)
		Tabulated law	(38)
		Generalized Maxwell-Kelvin	(40)
		Hyper visco-elastic	(62)
		Visco-elastic	(66)
		Tabulated law, hyper visco-elastic	(70)
		Isotropic visco elastic model	—
	Visco-plastic	Closed cell, elasto-plastic foam	(33)

（续）

类　型	描　述	模　型	LAW No.
液体动力学材料	Strain rate and temperature dependence on yield stress	Johnson-Cook	(4)
	Turbulent viscous flow	Hydrodynamic viscous	(6)
	Elasto-plastic hydrodynamic	von Mises isotropic hardening with polynomial pressure	(3)
		Semi-analytical elasto-plastic	(76)
	Multiphase Gray E.O.S + Johnson's shear law	Gray model	(16)
	Hydrodynamics	Lee-Tarver material	(41)
	Elasto-plastic hydrodynamic with thermal softening	Steinberg-Guinan	(49)
多物质多相材料	Multimaterials	Solid, liquid and gas	(51)
空材料	Void material	Fictitious	(0)
爆炸物	Detonation driven by time	Jones Wilkins Lee model	(5)
	Hydrodynamics	Lee-Tarver material	(41)
	Multimaterials	Solid, liquid and gas	(51)

根据材料的基本物理性质，通常按如下一般性建议来选取相应的 RADIOSS Block 材料模型对它们进行材料建模。

1．金属合金

（1）LAW1：弹性材料。
（2）LAW2：弹塑性材料。
（3）LAW27：弹塑性脆性材料。
（4）LAW36：表格式分段线性弹塑性材料。
（5）LAW60：二次应变率插值的表格式弹塑性材料。
（6）LAW66：粘弹塑性分段线性材料。

2．奥氏体钢和不锈钢

（1）LAW63：Hansel 材料（Trip Steel Plastic）。
（2）LAW64：Ugine 和 Alz 材料（Trip Steel）。

3．可压碎泡沫与蜂窝材料

（1）LAW28：蜂窝材料。
（2）LAW50：发泡泡沫。
（3）LAW68：Cosserat 介质。

4．泡棉

（1）LAW33：闭孔粘弹塑性。
（2）LAW35：广义 Kelvin-Voigt 开/闭孔。
（3）LAW38：表格式粘弹性材料。
（4）LAW70：表格式超粘弹性材料。

5．橡胶

（1）LAW42：Ogden，Mooney-Rivlin。

（2）LAW62：超粘弹材料。

6．塑料

（1）LAW36：表格式分段线性弹塑性材料。

（2）LAW65：弹性体（Elastomer）。

LAW76：半解析塑性模型（SAMP）。

7．玻璃

（1）LAW27：弹塑性脆性材料。

（2）LAW36：表格式弹塑性材料。

8．复合材料

（1）LAW36：表格式分段线性弹塑性材料。

（2）LAW15：Tsai-Wu 塑性+Chang−Chang 失效模型。

（3）LAW25：Tsi-Wu 塑性材料。

9．织物

（1）线弹性各向异性材料。

（2）非线性弹性材料。

10．炸药

LAW5：JWL（Jones Wilkins Lee）材料。

需要说明的是，实际应用中材料模型的选用还需要考虑有限元单元类型与材料模型的兼容性问题，例如：表格式弹塑性材料（LAW36）不能与 Truss 及 Beam 单元兼容，蜂窝材料（LAW28）只能与 Solid 单元匹配使用。不同的单元类型及公式与材料的兼容性，请查阅 HyperWorks 帮助文档中 RADIOSS 求解器相关部分。

16.2　常用材料模型

线弹性材料模型（/MAT/LAW1 或/MAT/ELAST）是最简单的材料模型，用于满足 Hook 定律的纯线弹性材料，在定义时仅需要输入密度和泊松比，本节不再介绍。

16.2.1　LAW2

作为最经典的弹塑性动力学材料模型，Johnson-Cook 材料模型在结构力学里应用非常广泛。在 RADIOSS Block 里对应的卡片是/MAT/LAW2 或/LAW/PLAS_JOHNS。在此材料模型中，材料达到塑性之前，真实应力按杨氏模量计算，在达到塑性后，材料的真实应力（又称流动应力）表达为塑性应变、应变率和温度的函数，即

$$\sigma=(a+b\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n})\left(1+c\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)+(1-T^{*m})$$

式中，σ是真实应力；ε_p是塑性应变；a是屈服强度；b是硬化模量；n是硬化指数；c是应变率系数；$\dot{\varepsilon}$是应变率；$\dot{\varepsilon}_0$是参考应变率；$T^*=\dfrac{T-T_r}{T_{melt}-T_r}$，$T$是温度，$T_r$是室温，$T_{melt}$是熔化温度；$m$是温度指数。

/MAT/LAW2 材料卡片如表 16−2 所示。

表 16−2　/MAT/LAW2 材料卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/MAT/LAW2/mat_ID/unit_ID or /MAT/PLAS_JOHNS/mat_ID/unit_ID									
mat_title									
ρ_i									
E		υ							
a		B		n		ε_p^{max}		σ_{max0}	
c		$\dot{\varepsilon}_0$		ICC	F_{smooth}	F_{cut}			
m		T_{melt}		C_p		Tr			

各个参数的解释如表 16−3 所示。

表 16−3　/MAT/LAW2 材料卡片各个参数的解释

数　据　域	内　　容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
mat_title	材料标题，字符，最大 100 位
ρ_i	密度，实数
E	杨氏模量，实数
υ	泊松比，实数
a	塑性屈服强度，实数
b	塑性硬化模量，实数
n	塑性硬化指数，实数，默认为 1.0
ε_p^{max}	失效塑性应变，实数，默认为 10^{30}
σ_{max0}	塑性最大应力，实数，默认为 10^{30}
c	应变率系数，实数，默认为 0.0 = 0：无应变率效应

（续）

数 据 域	内　　容
$\dot{\varepsilon}_0$	参考应变率，实数 如果 $\dot{\varepsilon} \leqslant \dot{\varepsilon}_0$，则无应变率效应
ICC	应变率计算标识，整数 = 0: 默认设为 1 = 1: 应变率对σ_{max0}有效 = 2: 应变率对σ_{max0}无效
F_{smooth}	应变率光顺标识，整数 = 0: 默认值，应变率不进行光顺 = 1: 激活应变率光顺
F_{cut}	应变率滤波截止频率，实数，默认为 10^{30}
m	温度指数，实数 = 0: 无温度效应
T_{melt}	熔化温度，实数，默认为 10^{30}
ρC_p	单位体积比热熔，实数
Tr	室温，实数，默认为 298 K

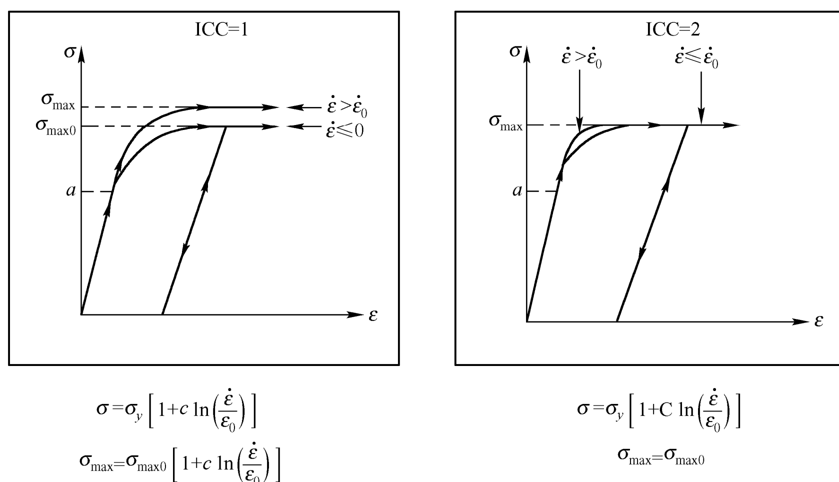
（1）屈服强度必须严格为正值。

（2）当塑性应变ε_p达到失效塑性应变ε_p^{max}时，无论材料处于何种状态（受拉伸、受压缩还是受剪切），如果是 Shell，那么该单元将被删掉，而如果是 Solid，该单元的偏应力将被设定为 0，而单元本身不被删除。

（3）塑性硬化指数 n 不能小于 1。

（4）如果 c 是 0，那么该材料模型将不考虑应变率效应。如果 c 不是 0，将参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 设为 10^{30}时，也是没有应变率效应的。

（5）应变率计算标识 ICC 用于表明最大应力σ_{max}是否受应变率的影响，如图 16−1 所示。



$$\sigma=\sigma_y\left[1+c\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]$$

$$\sigma_{max}=\sigma_{max0}\left[1+c\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]$$

$$\sigma=\sigma_y\left[1+C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]$$

$$\sigma_{max}=\sigma_{max0}$$

图 16−1　LAW2 的 ICC 标识

（6）应变率滤波是用来光顺应变率的，用来过滤高频数值噪声，其截止频率（F_{cut}）仅对 Shell 和 Solid 单元有效。

（7）对于 Truss 和 Beam 单元，该材料模型不激活温度效应。

（8）如果单位体积比热容$\rho C_p=0$，则温度恒定，$T=T_r$。

（9）温度 T 的计算是基于绝热条件的，初始温度 $T_i=T_r$，$T=T_r+\dfrac{E_{int}}{\rho C_p(\text{Volume})}$，其中 E_{int} 是计算得到的内能。

（10）如果要考虑温度效应，那么必须激活应变率效应。

（11）如果该材料模型用于基于有限元传热分析（/HEAT/MAT 选项 I_{form}=1）的热学材料，那么 T_r 的参数将从/HEAT/MAT 卡片里获取，而不是该材料卡片。参数ρC_p也是这样。

16.2.2 LAW27

LAW27 是含脆性拉伸失效破坏的 LAW2 模型，其弹塑性描述同 LAW2 一样，但 LAW27 仅用于普通 Shell（/PROP/SHELL）和夹层 Shell（/PROP/SH_SANDW）单元，常用在玻璃、铝等脆性材料上。

LAW27 的失效模型是通过引入裂纹的假设来表征的：当材料上某点的拉伸塑性应变达到某临界值时，材料将在该处产生一条垂直于主应力方向的裂纹。通过定义初始裂纹主应力（应变）方向 1 与方向 2 的塑性应变，可以明确材料的失效判据。

在每个方向（主应变方向 1 和主应变方向 2），其拉伸失效通过以下 4 个参数来表达（见图 16-2）：ε_t，初始拉伸失效应变；ε_m，最大拉伸失效应变；d_m，最大破坏值；ε_f，删除单元的拉伸应变。

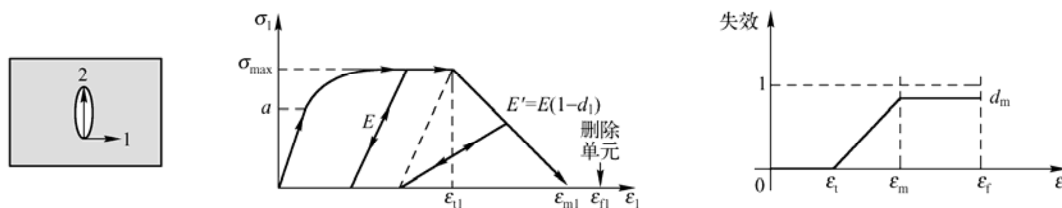


图 16-2　拉伸失效参数

16.2.3 LAW36

与 Johnson-Cook 模型使用数学方程描述流动行为（真实应力-塑性应变关系）不同，另一种常用的弹塑性材料模型，表格式分段线性弹塑性材料 LAW36 使用用户自定义曲线的方式来表达材料的流动行为。它使用一组不同应变率下的真实应力-塑性应变曲线来包含应变率效应，同一应变率下任意两个相邻真实应力-塑性应变曲线数据点之间使用线性插值，而相邻应变率之间某应变率下的行为也使用插值计算，因此通常将这种材料模型称为表格式分段线性弹塑性材料模型，在 RADIOSS Block 里对应的卡片是/MAT/LAW36 或/MAT/PLAS_TAB。

如果仅定义了一条曲线，则该材料模型将不考虑应变率效应。在定义了多条（最多

10 条）不同应变率下的真实应力-塑性应变曲线时，如图 16-3a 所示，推荐激活应变率滤波选项。

材料实际行为超出输入曲线给定的应变范围时，RADIOSS Block 将按照曲线最后两点的斜率向外插值。因此，LAW36 材料的输入曲线不能自身相交叉，且在材料可能的最大工作应变区间内按斜率外插的曲线也不能相交叉，如图 16-3b 所示。

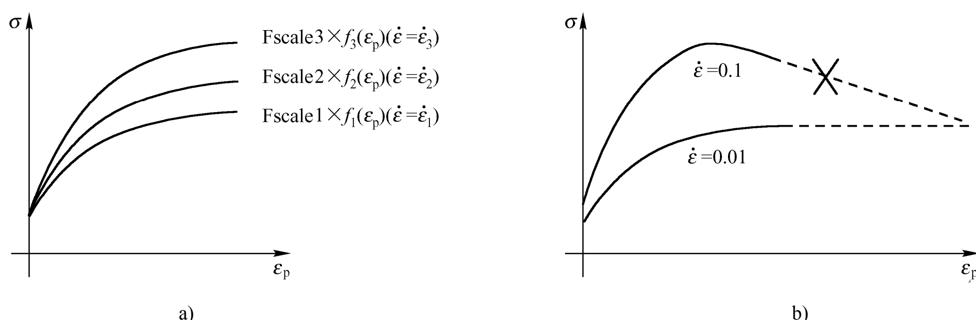


图 16-3　LAW36

LAW36 材料卡片本身自带简单的可定义的塑性应变失效参数，用于定义拉伸的失效开始、失效结束、删除单元，同时可以定义一个与应力状态无关的最大失效应变。

/MAT/LAW36 材料卡片如（以 5 组曲线输入格式为例）表 16-4 所示。

表 16-4　/MAT/LAW36 材料卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/MAT/LAW36/mat_ID/unit_ID or /MAT/PLAS_TAB/mat_ID/unit_ID									
mat_title									
ρ_i									
E		υ		ε_p^{max}		ε_{t1}		ε_{t2}	
N_{funct}	F_{smooth}	C_{hard}		F_{cut}		ε_f			
fct_ID_p	Fscale								
fct_ID_1	fct_ID_2	fct_ID_3	fct_ID_4	fct_ID_5					
$Fscale_1$		$Fscale_2$		$Fscale_3$		$Fscale_4$		$Fscale_5$	
$\dot{\varepsilon}_1$		$\dot{\varepsilon}_2$		$\dot{\varepsilon}_3$		$\dot{\varepsilon}_4$		$\dot{\varepsilon}_5$	

各个参数的解释如表 16-5 所示。

表 16-5　/MAT/LAW36 材料卡片各个参数的解释

数　据　域	内　　容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
mat_title	材料标题，字符，最大 100 位
ρ_i	密度，实数
E	杨氏模量，实数

（续）

数 据 域	内 容
υ	泊松比，实数
ε_p^{max}	最大失效应变（与应力状态无关），实数，默认为 10^{30}
ε_{t1}	初始拉伸失效应变，实数，默认为 10^{30}
ε_{t2}	最大拉伸失效破坏应变，实数，默认为 2×10^{30}
N_{funct}	曲线数目，整数
F_{smooth}	应变率光顺标识，整数 = 0: 默认值，应变率不进行光顺 = 1: 激活应变率光顺
C_{hard}	硬化系数，实数 = 0: 硬化完全各向同性 = 1: 硬化使用动态 Prager-Ziegler 模型 = 值在 0 和 1 之间：硬化在上述两者之间插值
F_{cut}	应变率滤波截止频率，实数，默认为 10^{30}
ε_f	删除单元的拉伸应变，实数，默认为 10^{30}
fct_ID$_p$	定义压力-真实应力缩放系数的曲线 ID，整数，默认为 0
Fscale	定义压力-真实应力缩放系数的曲线 ID 的缩放因子，实数，默认为 1.0
fct_IDi，i=1,…,5	应变率为 $\dot{\varepsilon}_i$ 时，真实应力-塑性应变曲线 ID，整数
Fscalei，i=1,…,5	曲线 fct_ID*i* 的纵坐标缩放因子，实数
$\dot{\varepsilon}_i$，i=1,…,5	$\dot{\varepsilon}_i$ 的值，实数

（1）真实应力-塑性应变曲线的第一个数据点应该对应塑性应变为 0 的真实应力。

（2）当塑性应变到达最大失效应变 ε_p^{max} 后，无论该单元的应力状态是受拉伸、受压缩还是受剪切，单元都将被删除。

（3）当最大主应变 ε_1 大于 ε_{t1} 时，真实应力将按下式下降：

$$\sigma = \sigma\left(\frac{\varepsilon_{t2}-\varepsilon_1}{\varepsilon_{t2}-\varepsilon_{t1}}\right)$$

（4）当最大主应变 ε_1 大于 ε_{t2} 时，真实应力下降为 0，但是单元并不删除。

（5）当最大主应变 ε_1 大于 ε_f 时，单元删除。

（6）动态硬化模型不能用于全局积分公式（/PROP/SHELL 卡片里 N=0 的选项）。

（7）应变率滤波是用来光顺应变率的，用来过滤高频数值噪声，其截止频率（F_{cut}）仅对 Shell 和 Solid 单元有效。

（8）当材料实际工作的应变率超出定义的最大应变率时，RADIOSS Block 求解器将自动

向外线性插值，这可能会导致模型的不稳定或不正确变形。因此，建议最后一条曲线对应的应变率应该足够大，或者将最后一条曲线当做更大应变率下的曲线重复使用一次。

（9）当实际工作的应变率比定义的最小应变率还小时，将按最小的应变率处理。

（10）各个应变率的值需要严格单调升序。

16.2.4 LAW65

弹性体（Elastomer，又称人造橡胶）是具有粘性的聚合物，相比于其他材料，一般表现出低杨氏模量和高塑性应变的性质。在 RADIOSS Block 里材料模型/MAT/LAW65（ELASTOMER）很好地表达了这种材料的性质。

图 16−4 给出了 LAW65 的定义方法：每种应变率下，使用真实应力-真实应变（请注意：不是塑性应变）曲线定义其非线性弹塑性性质，同一应变率需要同时定义加载和卸载曲线。每种应变率下的初始屈服强度被定义为加载和卸载曲线的交点。未定义应变率时的材料行为，将使用已有值进行插值。杨氏模量必须大于所有曲线的最大斜率，它用于描述卸载过程的线性部分。

对于给定应变率下弹性区（真实应力小于加载和卸载曲线的交点）的卸载，材料的行为是弹性迟滞的，直接按杨氏模量卸载至卸载曲线上，然后沿卸载曲线回至（0，0）点。在塑性区，卸载曲线将先发生偏移（偏移量是塑性应变），然后沿偏移后的卸载曲线卸载至应力为 0 的点（对应的应变值是残余的塑性应变）。对于给定应变率下的循环加载和卸载，前一次载荷历程的残余塑性应变会使卸载曲线偏移，生成新的屈服强度，它和偏移后的卸载曲线将对下一次载荷历程有效，如图 16−5 所示。

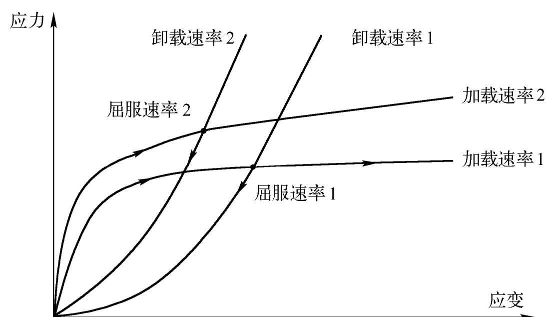


图 16−4　LAW65 加载和卸载应力−应变曲线的定义

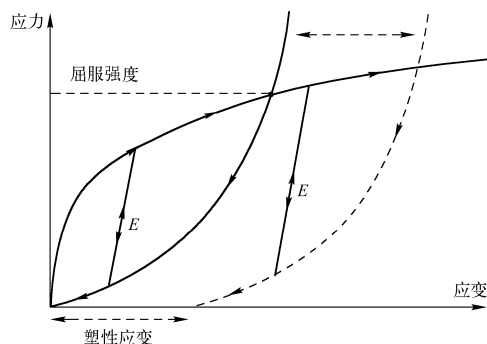


图 16−5　LAW65 卸载和循环载荷行为

/MAT/LAW65 材料卡片如（以仅给出一组应变率时的曲线为例）表 16−6 所示。

表 16−6　/MAT/LAW65 材料卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/MAT/LAW65/mat_ID/unit_ID or /MAT/ELASTOMER/mat_ID/unit_ID									
mat_title									
ρ_i									
E		υ		ε_{max}					
Nrate	F_{smooth}	F_{cut}							
fct_ID_L	fct_ID_{ul}	$Fscale_{stress}$		$\dot{\varepsilon}$					

各个参数的解释如表 16-7 所示。

表 16-7 /MAT/LAW65 材料卡片各个参数的解释

数 据 域	内 容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
mat_title	材料标题，字符，最大 100 位
ρ_i	密度，实数
E	初始杨氏模量，实数
υ	泊松比，实数
ε_{max}	失效塑性应变，实数
Nrate	加载和卸载曲线的组数目，整数，默认为 50
F_{smooth}	应变率光顺标识，整数 = 0：默认值，应变率不进行光顺 = 1：激活应变率光顺
F_{cut}	应变率滤波截止频率，实数，默认为 10^{30}
fct_ID_L	加载过程应力-应变曲线 ID，整数
fct_ID_{ul}	卸载过程应力-应变曲线 ID，整数
$Fscale_{stress}$	曲线纵轴（应力）的缩放因子
$\dot{\varepsilon}$	应变率，默认为 1.0

16.2.5 LAW68

传统的连续介质力学方法并不包含任何材料的长度尺度，然而在某些真实的物理材料里，很多重要的长度尺度是必须要考虑的，比如颗粒、悬浮颗粒、纤维和细胞结构等，而研究微观结构材料的平动和转动自由度是解决这一问题的基础。因此，力学理论界和工程界又回到了早在 20 世纪初就提出的以 Cosserat 兄弟命名的 Cosserat 理论，该理论在连续实体建模中引入偶应力（couple stresses），增加了平衡方程，使得应力不再对称。现在该理论已广泛用于具有一定微结构介质的连续介质变形与应力问题。

/MAT/LAW68 是基于 Cosserat 理论的蜂窝材料模型，相比于经典蜂窝材料模型/MAT/LAW28（HONEYCOMB）而言，其考虑了非对称的剪切行为，具有更好的精度和稳定性。因此，对于蜂窝材料，推荐使用/MAT/LAW68（COSSER）。

需要特别说明的是，当 Solid 单元被赋予/MAT/LAW68 材料时，RADIOSS Block 求解器将在内部自动对这些 Solid 单元使用带旋转自由度（即每个节点 6 自由度）的单元算法。

/MAT/LAW68 材料卡片如表 16-8 所示。

表 16−8　/MAT/LAW68 材料卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/MAT/LAW68/mat_ID/unit_ID or /MAT/COSSER/mat_ID/unit_ID									
mat_title									
ρ_i									
E_{11}		E_{22}		E_{33}					
G_{12}		G_{23}		G_{31}					
fct_ID$_{11i}$	fct_ID$_{22i}$	fct_ID$_{33i}$	Iflag$_1$	Fscale$_{11i}$		Fscale$_{22i}$		Fscale$_{33i}$	
ε_{max11i}		ε_{max22i}		ε_{max33i}					
fct_ID$_{12i}$	fct_ID$_{23i}$	fct_ID$_{31i}$	Iflag$_2$	Fscale$_{12i}$		Fscale$_{23i}$		Fscale$_{31i}$	
ε_{max12i}		ε_{max23i}		ε_{max31i}					
fct_ID$_{21i}$	fct_ID$_{32i}$	fct_ID$_{13i}$		Fscale$_{21i}$		Fscale$_{32i}$		Fscale$_{13i}$	
fct_ID$_{11r}$	fct_ID$_{22r}$	fct_ID$_{33r}$		Fscale$_{11r}$		Fscale$_{22r}$		Fscale$_{33r}$	
$\varepsilon_{trans11r}$		$\varepsilon_{trans22r}$		$\varepsilon_{trans33r}$					
fct_ID$_{12r}$	fct_ID$_{23r}$	fct_ID$_{31r}$		Fscale$_{12r}$		Fscale$_{23r}$		Fscale$_{31r}$	
$\varepsilon_{trans12r}$		$\varepsilon_{trans23r}$		$\varepsilon_{trans31r}$					
fct_ID$_{21r}$	fct_ID$_{32r}$	fct_ID$_{13r}$		Fscale$_{21r}$		Fscale$_{32r}$		Fscale$_{13r}$	

限于篇幅，这里不再对此卡片的各个参数进行解释，请查阅 HyperWorks 帮助文档中 RADIOSS 求解器相关部分对此卡片的解释。

16.2.6 LAW70

/MAT/LAW70（FOAM_TAB）是 RADIOSS Block 里使用较为广泛的泡沫材料模型，它是粘弹性表格式材料模型，适用于 Solid 单元，兼容的单元公式选项为：I_{solid}=1 （Belytschko 单元公式），I_{smtr}=1（小应变公式），I_{frame}=1（非共旋坐标公式），对于四面体网格也有很好的稳定性。它使用不同速率下的应力−应变加载曲线来表达加载应变率的影响，同时还可以定义不同卸载应变率下的曲线。图 16−6 所示为一组加载应力−应变曲线示例。

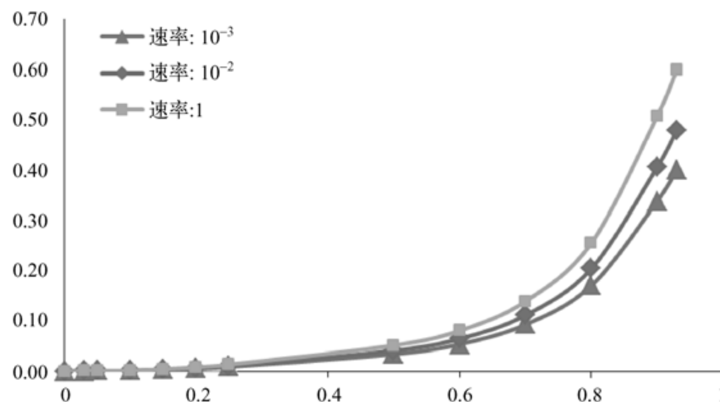


图 16−6　一组加载应力−应变曲线示例

需要注意的是，由于该材料模型匹配的单元公式是小应变公式，因此材料的加载和卸载应力-应变曲线的输入应该是工程应力和工程应变，而不是真实应力和真实应变。

/MAT/LAW70 材料卡片如（以仅有一条加载和一条卸载曲线的情况为例）表 16-9 所示。

表 16-9 /MAT/LAW70 材料卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/MAT/LAW70/mat_ID/unit_ID or /MAT/FOAM_TAB/mat_ID/unit_ID									
mat_title									
ρ_i									
E_0		υ		E_{max}		ε_{max}			
F_{cut}		F_{smooth}	Nload	Nunload	Iflag	Shape		Hys	
fct_ID$_L$	$\dot{\varepsilon}_{load}$		Fscale$_{load}$						
fct_ID$_{ul}$	$\dot{\varepsilon}_{unload}$		Fscale$_{unload}$						

各个参数的解释如表 16-10 所示。

表 16-10 /MAT/LAW 材料卡片各个参数的解释

数 据 域	内 容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
mat_title	材料标题，字符，最大 100 位
ρ_i	密度，实数
E_0	初始杨氏模量，实数
υ	泊松比，实数
E_{max}	最大杨氏模量，实数
ε_{max}	失效应变，实数
F_{cut}	应变率滤波截止频率，实数，默认为 10^{30}
F_{smooth}	应变率光顺标识，整数 = 0: 默认值，应变率不进行光顺 = 1: 激活应变率光顺
Nload	加载曲线数目，整数
Nunload	卸载曲线数目，整数

（续）

数据域	内容
Iflag	卸载响应控制标识，整数 = 0：默认值，材料行为符合定义的加载和卸载曲线 = 1：加载曲线被加载过程和卸载过程同时使用。卸载过程的偏应力损伤使用准静态的卸载曲线：$\sigma=(1-D)(\sigma+P)-P$，其中 D 由准静态卸载曲线计算，即 $D=\left(\dfrac{\sigma_{\text{unloading}}}{\sigma_{\text{quasi-static}}}\right)$ 式中，$\sigma_{\text{unloading}}$、$\sigma_{\text{quasi-static}}$ 是当前应力，分别通过卸载和准静态曲线计算获得；P 是压力，$P=-(\sigma_{xx}+\sigma_{yy}+\sigma_{zz})/3$ = 2：加载曲线被加载过程和卸载过程同时使用。卸载应力张量通过准静态卸载曲线减小为$\sigma=(1-D)\sigma$，其中 D 由准静态卸载曲线计算，即 $D=\left(\dfrac{\sigma_{\text{unloading}}}{\sigma_{\text{quasi-static}}}\right)$ 式中，$\sigma_{\text{unloading}}$、$\sigma_{\text{quasi-static}}$ 是当前应力，分别通过卸载和准静态曲线计算获得 = 3：加载曲线被加载过程和卸载过程同时使用。卸载偏应力减小为$\sigma=(1-D)(\sigma+P)-P$，其中 D 为 $D=(1-\text{Hys})\left[1-\left(\dfrac{W_{\text{cur}}}{W_{\max}}\right)^{\text{Shape}}\right]$ 式中，W_{cur} 和 $W_{\max}$ 是当前能量和最大能量 = 4：加载曲线被加载过程和卸载过程同时使用。卸载应力张量减小为$\sigma=(1-D)\sigma$，其中 D 为 $D=(1-\text{Hys})\left[1-\left(\dfrac{W_{\text{cur}}}{W_{\max}}\right)^{\text{Shape}}\right]$ 式中，W_{cur} 和 $W_{\max}$ 是当前能量和最大能量 Iflag = 3, 4 的情况，不使用卸载曲线
Shape	形状因子，实数，默认为 1.0
Hys	迟滞卸载因子，实数，默认为 1.0
fct_ID_{L}	加载过程应力–应变曲线 ID，整数
$\dot{\varepsilon}_{\text{load}}$	加载过程应变率，实数
$\text{Fscale}_{\text{load}}$	加载过程应力–应变曲线的缩放因子，实数
$\text{fct_ID}_{\text{ul}}$	卸载过程应力–应变曲线 ID，整数
$\dot{\varepsilon}_{\text{unload}}$	卸载过程应变率，实数
$\text{Fscale}_{\text{unload}}$	卸载过程应力–应变曲线的缩放因子，实数

16.2.7 LAW82

Ogden 模型是经典的超弹性材料模型，用于描述不可压缩或近似不可压缩材料（如橡胶、高分子材料、生物组织等）的非线性应力–应变关系。它假定材料的行为可以使用应变能密度描述，而应力–应变关系则可以由此间接得到，基本假设是各向同性、不可压缩、应变率相关性。

RADIOSS Block 里共有两种超弹材料定义方式，其中/MAT/LAW42（Ogden）和/MAT/LAW82 是理论型 Ogden 模型，可转化为 Mooney-Rivlin 模型和 Neo-Hookean 模型，定义时需要输入 Ogden 模型的参数；/MAT/LAW69 是 11.0 版本新开发的，它允许用户直接输入单轴试验数据，在指定拟合阶次后，RADIOSS Block 求解器内部将使用非线性最小二乘法拟合出 Ogden 模型的参数。这里以/MAT/LAW82 为代表进行介绍。

不可压缩材料的应变能密度 W 由下式确定：

$$W=\sum_{i=1}^{N}\frac{2\mu_i}{\alpha_i^{2}}(\bar{\lambda}_1^{\alpha_i}+\bar{\lambda}_2^{\alpha_i}+\bar{\lambda}_3^{\alpha_i}-3)+\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{D_i}(J-1)^{2i}$$

式中，$\bar{\lambda}=J^{-\frac{1}{3}\lambda}$；$J=\lambda_1\lambda_2\lambda_3$；$\lambda_i$ 是第 i 个主伸长。

体积模量 $K=-V\dfrac{\partial P}{\partial V}$，其中 P 是压力，V 是体积。

当 $v=0$ 时，$K=\dfrac{2}{D_1}$；当 $v\neq0$ 时，$K=\dfrac{2(1+v)}{3(1-2v)}G$；当 $v=0$ 且 $D_1=0$ 时，$v=0.475$。

地面剪切模量 $G=\sum_{1}^{N}\mu_i$。

/MAT/LAW82 材料卡片如（以 N=3 为例）表 16-11 所示。

表 16-11　/MAT/LAW82 材料卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/MAT/LAW82/mat_ID/unit_ID									
mat_title									
ρi									
N		υ							
μ1		μ2		μ3					
α1		α2		α3					
D_1		D_2		D_3					

各参数的意义见能量密度公式。如果想得到无泊松比效应的材料，则应将 v 定义成一个很小的值，比如 10^{-10}，而不是绝对的 0，以避免数值问题。

16.3　RADIOSS Block 失效模型概述

对于给定的一种材料，最多可以同时指定 6 个不同的失效模型，每个失效模型表征一种失效模式。其卡片格式如表 16-12 所示。

表 16-12　失效模型卡片格式

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/FAIL/key/mat_ID/unit_ID									

各个参数的解释如表 16-13 所示。

表 16-13　失效模型卡片各个参数的解释

数　据　域	内　　容
key	失效模型关键字（见表 16-14）
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位

表 16-14 对 RADIOSS Block 里的失效模型进行了简要描述。

表 16-14　RADIOSS Block 失效模型

失效模型关键字	类　　型	描　　述
CHANG	Chang-Chang 模型	复合材料失效模型
CONNECT	法向和切向失效模型	仅与/MAT/CONNECT 匹配
ENERGY	各向同性能量	比能量
FLD	成形极限图	成形极限图（FLD）
HASHIN	复合材料模型	Hashin 模型
JOHNSON	延性失效模型	Johnson-Cook
LAD_DAMA	复合材料层离	Ladeveze 层离模型
PUCK	复合材料模型	Puck 模型
SPALLING	延性+散裂	散裂 + Johnson-Cook
TAB	应变失效模型	应变失效
TBUTCHER	Tuler-Butcher 模型	疲劳失效
TENSSTRAIN	拉伸	应变失效
WIERZBICKI	延性失效模型	Bao-Xue-Wierzbicki 模型
WILKINS	延性失效模型	Wilkins 模型
XFEM_FLD	XFEM 成形极限图	XFEM FLD
XFEM_JOHNS	XFEM延性失效模型	XFEM Johnson-Cook
XFEM_TBUTC	XFEM 延性（脆性）失效模型	修正的 Tuler-Butcher 模型

与材料模型一样，实际应用中失效模型的选用还必须考虑它与有限元单元类型及材料模型的兼容性问题，例如：/FAIL/CONNECT 只能与/MAT/CONNECT 和 8 节点 Solid 单元匹配使用，而/FAIL/CHANG 只能与/LAW15 和/LAW25 及 Shell 单元匹配使用。不同失效模型与单元类型及材料模型的兼容性，请查阅 HyperWorks 帮助文档中 RADIOSS 求解器的相关部分。

16.4　常用失效模型

如前文所述，RADIOSS Block 里部分材料模型已经自带失效模型，如 LAW2、LAW27、LAW36 和 LAW15 等。但在工程应用中，为了得到更为精确的失效行为，建议结合失效模型来进行详细的材料建模。本节将对以下几种常用的失效模型进行介绍：/FAIL/FLD，/FAIL/TENSSTRAIN，/FAIL/JOHNSON，/FAIL/TBUTCHER，/FAIL/WIERZBICKI，/FAIL/CHANG。

16.4.1　/FAIL/FLD

成形极限图（FLD）最早的起源和应用来自于板料成形工业，用于反映板料在冲压过程中的破坏情况，它使用板料面内的二维应变（分别称为主应变和次应变）状态来确定材料是

否达到失效区，如图 16-7 所示。/FAIL/FLD 仅能与 Shell 单元匹配使用。

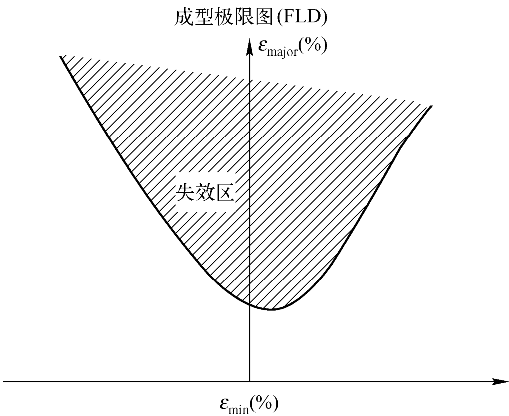


图 16-7　FLD 曲线

/FAIL/FLD 失效卡片如表 16-15 所示。

表 16-15　/FAIL/FLD 失效卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/FAIL/FLD/mat_ID/unit_ID									
fct_ID	I_{shell}								

各个参数的解释如表 16-16 所示。

表 16-16　/FAIL/FLD 失效卡片各个参数的解释

数　据　域	内　　容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
fct_ID	FLD 曲线的 ID，整数
I_{shell}	Shell 单元标识，整数，用于复合材料 Shell = 1：如果 Shell 的某一层达到失效区，则立即删除该单元 = 2：如果 Shell 的某一层达到失效区，则该层的应力张量设为 0；当所有层都达到失效区时，删除该单元

16.4.2　/FAIL/TENSSTRAIN

/FAIL/TENSSTRAIN 是一种仅考虑拉伸状态的失效模型，如图 16-8 所示，在材料变形过程中，计算损伤破坏值 D：第一主应变ε_1 达到材料的最大应变ε_{t1} 时，损伤破坏值 D 计为 0；第一主应变ε_1 再继续增大到材料的拉伸失效应变ε_{t2} 时，损伤破坏值 D 达到 1，材料彻底破坏。对于多积分点类型的单元，只要该单元中一个积分点的损伤破坏值 D 达到 1，该单元就将被立即删除。/FAIL/TENSSTRAIN 与所有 2D 及 3D 单元类型兼容。

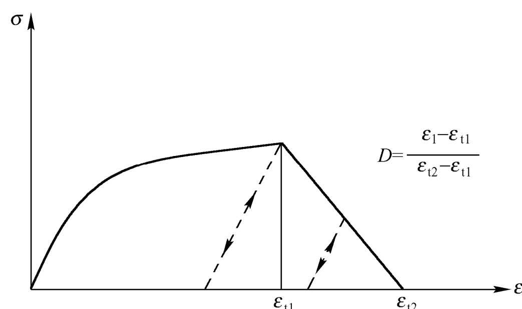


图 16-8　拉伸失效模型

/FAIL/TENSSTRAIN 失效卡片如表 16-17 所示。

表 16-17　/FAIL/TENSSTRAIN 失效卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/FAIL/TENSSTRAIN/mat_ID/unit_ID									
ε_{t1}		ε_{t2}		fct_ID					

各个参数的解释如表 16-18 所示。

表 16-18　/FAIL/TENSSTRAIN 失效卡片各个参数的解释

数　据　域	内　　容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
ε_{t1}	最大应变，实数，默认为 10^{30}
ε_{t2}	拉伸失效应变，实数，默认为 2.0×10^{30}
fct_ID	ε_{t1}、ε_{t2} 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 相关的缩放因子曲线 ID，整数

16.4.3　/FAIL/JOHNSON

Johnson-Cook 失效模型（/FAIL/JOHNSON）是 20 世纪 80 年代中期基于塑性应变失效现象描述发展出来的失效模型，由于它能对大部分结构力学的失效现象进行较为准确的再现，且构建简洁，失效参数容易获取，直到现在还依然广泛应用于工程与科研中。在 RADIOSS Block 里，Johnson-Cook 失效模型可以与所有 2D 和 3D 单元兼容。

在 Johnson-Cook 失效模型里，累积损伤破坏值 D 达到 1 时材料破坏，其定义为

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{p}}}{\varepsilon_{\mathrm{f}}}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{f}}=\left[D_1+D_2\exp\left(D_3\sigma^*\right)\right]\left[1+D_4\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1+D_5T^*\right]$$

式中，$\sigma^* = \dfrac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}$、$\sigma_m$ 是平均主应力，$\sigma_m = \dfrac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$，$\sigma_{vm}$ 是 Von Mises 应力（等效应力）。

/FAIL/JOHNSON 失效卡片如表 16−19 所示。

表 16−19 /FAIL/JOHNSON 失效卡片

<table>
<tr><td>(1)</td><td>(2)</td><td>(3)</td><td>(4)</td><td>(5)</td><td>(6)</td><td>(7)</td><td>(8)</td><td>(9)</td><td>(10)</td></tr>
<tr><td colspan="10">/FAIL/JOHNSON/mat_ID/unit_ID</td></tr>
<tr><td colspan="2">D_1</td><td colspan="2">D_2</td><td colspan="2">D_3</td><td colspan="2">D_4</td><td colspan="2">D_5</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\dot{\varepsilon}_0$</td><td>I_{shell}</td><td>I_{solid}</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

各个参数的解释如表 16−20 所示。

表 16−20 /FAIL/JOHNSON 失效卡片各个参数的解释

数 据 域	内 容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
$D_1,\cdots,D_5$	失效参数，实数 $D_1,\cdots,D_5$，实数
$\dot{\varepsilon}_0$	参考应变率，实数
I_{shell}	Shell 单元标识，整数 = 1: 默认，如果一个积分点或一层单元的 D 值达到 1，则立即删除单元 = 2: 如果一个积分点或一层单元的 D 值达到 1，则将其应力张量设为 0；当所有积分点或所有层都达到 1 时，删除单元
I_{solid}	Solid 单元标识，整数 = 1: 默认，如果 Solid 的一个积分点的 D 值达到 1，则立即删除单元 = 2: 如果每一个积分点的 D 值均达到 1，则该单元的偏应力张量消去

16.4.4 /FAIL/TBUTCHER

Tuler-Butcher 累积损伤破坏模型（/FAIL/TBUTCHER）是一种被广泛使用的破坏模型。由于它的形式包容性强，因此在描述金属、岩石和混凝土等材料和介质的动态层离断裂问题时经常被采用。在 RADIOSS Block 里，/FAIL/TBUTCHER 与所有 2D 及 3D 单元兼容。

/FAIL/TBUTCHER 的破坏判据是累积损伤破坏值 D 大于或等于临界损伤积分 K，即 $D \geqslant K$，其中，累积损伤破坏值 D 的表达式为

$$D = \int_0^t \left[\mathrm{Max}\left(0, \sigma - \sigma_r\right)\right]^\lambda \mathrm{d}t$$

式中，σ 是最大主应力（拉应力），是时间相关量；σ_r 是断裂破坏应力；λ 是材料常数；t 是固体开裂的时间。

当 $\lambda=2$ 时，该失效模型本质上已成为能量破坏准则。当 $\lambda=1$ 时，本质上成为冲量破坏准则，即拉应力冲量达到某临界值时发生断裂，这在岩石和混凝土类材料的破坏研究中被大量使用。

/FAIL/TBUTCHER 失效卡片如表 16-21 所示。

表 16-21 /FAIL/TBUTCHER 失效卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/FAIL/TBUTCHER/mat_ID/unit_ID									
λ		K		σ_r		I_{shell}	I_{solid}		

各个参数的解释如表 16-22 所示。

表 16-22 /FAIL/TBUTCHER 失效卡片各个参数的解释

数 据 域	内 容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
λ	损伤累积指数，正实数
K	临界损伤积分，实数
σ_r	断裂破坏应力，实数
I_{shell}	Shell 单元标识，整数 = 1: 默认，如果一个积分点或一层单元的 $D \geqslant K$，则立即删除单元 = 2: 如果一个积分点或一层单元的 $D \geqslant K$，则将其应力张量设为 0；当所有积分点或所有层都达到 $D \geqslant K$ 时，删除单元
I_{solid}	Solid 单元标识，整数 = 1: 默认，如果 Solid 的一个积分点的 D 值达到 1，则立即删除单元 = 2: 如果每一个积分点的 D 值达到 1，则该单元的偏应力张量消去

16.4.5 /FAIL/WIERZBICKI

Bao-Xue-Wierzbicki 失效模型（/FAIL/WIERZBICKI）是一种较为复杂的失效模型，它包含了材料劣化、压力敏感、洛德角（Lode angle）相关、非线性损伤演化等描述。/FAIL/WIERZBICKI 与所有 2D 及 3D 单元兼容。

累积损伤破坏值 D 达到 1 时材料破坏，其定义为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f}$$

$$\varepsilon_f = \left\{ \left(C_1 e^{-C_2 \eta} \right)^n - \left[\left(C_1 e^{-C_2 \eta} \right)^n - \left(C_3 e^{-C^4 \eta} \right)^n \right] \left(1 - \xi^m \right)^{\frac{1}{m}} \right\}^{\frac{1}{n}}$$

对于 Solid 单元
$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}, \quad \xi = \frac{27}{2} \frac{J_3}{\sigma_{vm}^3}$$

对于 Shell 单元
$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}, \quad \xi = -\frac{27}{2} \eta \left(\eta^2 - \frac{1}{3} \right)$$

式中，σ_m 是静水应力；σ_{vm} 是 Von Mises 应力（等效应力）；$J_3 = S_1 S_2 S_3$ 是第三偏应力不变量。

/FAIL/WIERZBICKI 失效卡片如表 16−23 所示。

表 16−23 /FAIL/WIERZBICKI 失效卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/FAIL/WIERZBICKI/mat_ID/unit_ID									
C_1		C_2		C_3		C_4		m	
n		I_{shell}	I_{solid}	I_{moy}					

各个参数的解释如表 16−24 所示。

表 16−24 /FAIL/WIERZBICKI 失效卡片各个参数的解释

数 据 域	内 容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
$C_1,\cdots,C_4$	参数 $C_1,\cdots,C_4$，实数
m	参数 m，实数
n	硬化指数，实数
I_{shell}	Shell 单元标识，整数 = 1: 默认，如果一个积分点或一层单元的 *D* 值达到 1，则立即删除单元 = 2: 如果一个积分点或一层单元的 *D* 值达到 1，则将其应力张量设为 0；当所有积分点或所有层都达到 1 时，删除单元
I_{solid}	Solid 单元标识，整数 = 1: 默认，如果 Solid 的一个积分点的 *D* 值达到 1，则立即删除单元 = 2: 如果每一个积分点的 D 值均达到 1，则该单元的偏应力张量消去
I_{moy}	3D 单元（brick）失效标识，整数 = 0: η 和 ξ 取前文默认设置 = 1: 分别使用 η' 和 ξ'，其中 $\eta'=\dfrac{\int_0^{\varepsilon_p}\eta\,d\varepsilon_p}{\varepsilon_p}$， $\xi'=\dfrac{\int_0^{\varepsilon_p}\xi\,d\varepsilon_p}{\varepsilon_p}$

16.4.6 /FAIL/CHANG

Chang-Chang 失效模型（/FAIL/CHANG）是经典的复合材料破坏模型之一，它使用层合板理论考虑逐渐破坏过程，适用于纤维增强复合材料。在 RADIOSS Block 里，/FAIL/CHANG 失效模型只能与 Shell 单元及/MAT/LAW15（CHANG）和/MAT/LAW25（COMPSH）匹配使用。

RADIOSS Block 里的 Chang-Chang 失效模型（/FAIL/CHANG）是经典的 Chang-Chang 失效模型，共包含 4 种失效模式，但不包含分层（Delamination）失效。

（1）纤维破坏：纤维方向为 1 方向。

纤维拉伸模式：$\sigma_{11}>0$

$$e_f = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_1^t}\right)^2 + \beta\left(\frac{\sigma_{12}}{\bar{\sigma}_{12}}\right)^2 - 1.0 \qquad \begin{matrix} \geqslant 0\text{failed} \\ < 0\text{elastic - plastic} \end{matrix}$$

纤维压缩模式：$\sigma_{11} <0\, \sigma_{11}$

$$e_c = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_1^t}\right)^2 - 1.0 \qquad \begin{matrix} \geqslant 0\text{failed} \\ < 0\text{elastic - plastic} \end{matrix}$$

（2）基材破裂。

基材拉伸模式：$\sigma_{22} >0$

$$e_m = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_1^t}\right)^2 + \beta\left(\frac{\sigma_{12}}{\bar{\sigma}_{12}}\right)^2 - 1.0 \qquad \begin{matrix} \geqslant 0\text{failed} \\ < 0\text{elastic - plastic} \end{matrix}$$

基材压缩模式：$\sigma_{22} <0$

$$e_d = \left(\frac{\sigma_{22}}{2\bar{\sigma}_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{\sigma_2^c}{2\bar{\sigma}_{12}}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_{22}}{\sigma_2^c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{\bar{\sigma}_{12}}\right) - 1.0 \qquad \begin{matrix} \geqslant 0\text{failed} \\ < 0\text{elastic - plastic} \end{matrix}$$

式中，σ_1^t 是纵向抗拉强度；σ_2^t 是横向抗拉强度；$\bar{\sigma}_{12}$ 是抗剪强度；σ_1^c 是纵向抗压强度；σ_2^c 是横向抗压强度；β是剪切比例因子。

当单元的某个失效模式被激活（损伤因子大于或等于 1）时，单元将被删除（依赖于参数 I_{shell}），为避免数值不稳定问题，RADIOSS Block 使用动力松弛技术来按指数形式逐渐减小应力，即

$$[\sigma(t)] = f(t)\,[\sigma_d(t_r)]$$

$$f(t) = \exp\left(-\frac{t-t_r}{\tau_{max}}\right), t \geqslant t_r$$

式中，t 是时间；t_r 是失效被激活的起始时间；τ_{max} 是动力松弛时间；$[\sigma_d(t_r)]$是失效被激活时的应力分量。

/FAIL/CHANG 失效卡片格式如表 16−25 所示。

表 16−25 /FAIL/CHANG 失效卡片

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/FAIL/CHANG/mat_ID/unit_ID									
σ^t_1		σ^t_2		$\bar{\sigma}_{12}$		σ^c_1		σ^c_2	
β		τ_{max}		I_{shell}					

各个参数的解释如表 16−26 所示。

表 16−26 /FAIL/CHANG 失效卡片各个参数的解释

数 据 域	内 容
mat_ID	材料 ID，整数，最大 10 位
unit_ID	可选的单位制 ID，整数，最大 10 位
σ^t_1	纵向抗拉强度，实数，默认为 10^{30}
σ^t_2	横向抗拉强度，实数，默认为 10^{30}
$\bar{\sigma}_{12}$	抗剪强度，实数，默认为 10^{30}

（续）

数据域	内容
σ^c_1	纵向抗压强度，实数，默认为 10^{30}
σ^c_2	横向抗压强度，实数，默认为 10^{30}
β	剪切比例因子，实数，默认为 0
τ_{max}	动力松弛时间，实数，默认为 10^{30}
I_{shell}	Shell 单元删除标识，整数，默认为 1 = 1：如果纤维或基层的一层达到损伤，则删除 Shell 单元 = 2：如果纤维或基层的所有层达到损伤，则删除 Shell 单元 = 3：如果一层纤维层达到损伤，则删除 Shell 单元 = 4：如果所有纤维层达到损伤，则删除 Shell 单元

16.5 工程结构常用材料的建模

16.5.1 金属及其合金

对于结构常用的金属及其合金材料，如各种钢材、铝合金等，工程建模分析中一般采用基于连续性假设的弹塑性材料模型。RADIOSS Block 里有如表 16−27 所示的材料模型可以用来描述金属合金。

表 16−27　RADIOSS Block 里的材料模型

材料模型	描述
/MAT/LAW2	Johnson-Cook 材料
/MAT/LAW4	流体动力学 Johnson-Cook 材料
/MAT/LAW22	带损伤的 Johnson-Cook 材料（仅用于 Solid）
/MAT/LAW23	带损伤的 Johnson-Cook 材料（另一种公式，仅用于 Solid）
/MAT/LAW27	Johnson-Cook 材料（仅用于 Shell）
/MAT/LAW32	Hill 正交各向异性材料
/MAT/LAW36	分段线性弹塑性材料
/MAT/LAW43	Hill 正交各向异性材料
/MAT/LAW44	带 Cowper-Symonds 应变率效应的 Johnson-Cook 材料
/MAT/LAW48	Zhao Material Law
/MAT/LAW49	Steinberg-Guinan 材料（热软化弹塑性）
/MAT/LAW52	Gurson
/MAT/LAW53	单向正交各向异性弹塑性材料（仅用于 Solid）
/MAT/LAW57	Barlat 3 参数正交各向异性材料

（续）

材 料 模 型	描　　述
/MAT/LAW60	二次应变率插值的分段非线性弹塑性材料
/MAT/LAW63	Trip 钢塑性材料
/MAT/LAW64	Ugine 和 Alz Trip 钢材料
/MAT/LAW66	粘弹塑性分段线性材料
/MAT/LAW76	半解析塑性材料
/MAT/PLAS_ZERIL	Zerilli-Armstrong 弹塑性材料

1．标准拉伸试验数据到 FEA 输入数据的转换

为了获取材料的力学性能参数，最常见的测试方法是进行拉伸试验，获得图 16-9 中曲线 A 所示的工程应力-应变曲线，并依此得到屈服强度、抗拉强度、伸长率等参数。

应力
3
B
1
A
3
2
4
5
应变

图 16-9　应力-应变曲线

其中工程应力与工程应变定义如下：

$$S=\frac{P}{A_0},\quad e=\frac{l-l_0}{l_0}$$

式中，P 是载荷；A_0 是试样的原始横截面积；l_0 是试样的原始标距长度；l 是试样变形后的长度。

上述应力-应变曲线中的工程应力、应变是以试样的初始尺寸进行计算的，事实上，在拉伸过程中试样的尺寸是在不断变化的，尤其是超过材料的屈服强度后，试样的尺寸相对于原始值已有了较大的改变。为了表达材料真实的应力状态，工程上使用考虑瞬时载荷和瞬时截面积的真实应力来度量材料的真实应力状态，而其对应的应变称为真实应变（或对数应变）。

$$\sigma=\frac{P}{A}$$

$$\varepsilon=\int_{l_0}^{l}\frac{\mathrm{d}l}{l}=\ln\frac{l}{l_0}$$

式中，P 是瞬时载荷；A 是试样的瞬时截面积；l_0 是试验的原始标距长度；l 是试样的瞬时长度。

由塑性流动过程中体积不变的条件，易得到工程应力、应变与真实应力、应变的换算关系为

$$\sigma=S(1+e),\quad \varepsilon=\ln(1+e)$$

这样工程应力-应变曲线可以转换成真实应力-真实应变曲线，如图 16-9 中曲线 B 所示。

另外，在有限元分析中，描述材料的流动行为时通常会用到塑性应变这个概念，塑性应变等于真实总应变减去弹性应变，其计算公式如下：

$$\varepsilon_{\mathrm{p}}=\varepsilon-\sigma/E$$

有限元分析中常用的弹塑性材料模型都是对材料的真实应力与塑性应变（$\sigma-\varepsilon_{\mathrm{p}}$）关系进行的数学描述，因此，需要首先将从材料供应商处获得的工程应力-应变曲线按上式进行转换，然后按照选用的材料模型对其进行表达。

对于 LAW36，不涉及数学表达式的构建，各应变率下输入的曲线即为$\sigma-\varepsilon_{\mathrm{p}}$曲线。而对于 LAW 2 及 LAW27 材料模型，则需要对 Johnson-Cook 模型的参数进行反求。其步骤如下：

得到真实应力-真实应变曲线（如上所述）。

确定参数 a，将 0.2%应变对应的真实应力作为参数 a，如图 16-10a 所示。

得到$\sigma-\varepsilon_{\mathrm{p}}$曲线（如上所述），如图 16-10b 所示。

数学变换得到曲线 $\ln(\sigma-a)-\varepsilon_{\mathrm{p}}$，如图 16-10c 所示，并对数据点使用直线拟合，纵轴截距即为参数 b，斜率为参数 n。（注：也可对真实应力-塑性应变曲线进行曲线拟合，反求参数 b 和 n，详见 Hyper Math 相关帮助文档和例子）。

在真实应力-真实应变曲线上取得参数$\varepsilon_{\max}$，如图 16-10d 所示。

在真实应力-真实应变曲线上计算得到参数$\varepsilon_{\mathrm{t1}}$和$\varepsilon_{\mathrm{m1}}$，如图 16-10d 所示。

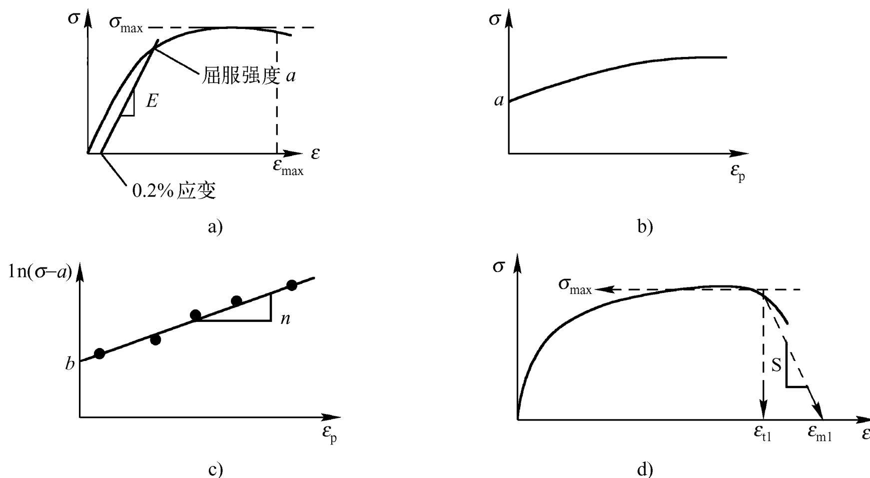


图 16-10　确定 LAW2 的参数

2．金属失效模拟

对于常见的金属及其合金材料，理论上，只要失效模型、单元类型、材料模型三者同时兼容，则失效模型就可以用于模拟该材料的失效。但在实际应用中还应考虑分析对象的实际载荷状态，比如对于受压缩载荷失效的分析对象，只定义拉伸失效模型是没有实际意义的。对于带有分层失效的复合材料分析对象，仅使用/FAIL/CHANG 失效模型也是不充分的，而使用/FAIL/HASHIN 则更为合适。也就是说，定义的失效模型应该至少包含分析对象主要工作载荷状态和失效载荷形态。

由于 Johnson-Cook 失效模型包含了全面的应力状态，包含压力相关性、应变率相关性和温度相关性，同时能与 2D 和 3D 单元兼容，因而适用范围非常广泛。

其失效应变表达式为

$$\varepsilon_{\mathrm{f}}=\left[D_1+D_2\exp\left(D_3\sigma^*\right)\right]\left[1+D_4\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1+D_5T^*\right]$$

在某些特定的应力状态下，应力三轴比σ^*可以直接使用解析值，这为该失效模型参数$D_i(i=1,\cdots,5)$的试验确定提供了工程上的方便性。比如，在纯拉伸状态下$\sigma^*=1/3$，在纯剪切状态下，$\sigma^*=0$，在纯压缩状态下，$\sigma^*=-1/3$。如果忽略应变率项 D_4 和温度项 D_5，则由上述三种试验准静态测试的失效塑性应变可求解参数 D_1、D_2、D_3。现举例说明如下。

假定某材料在纯拉伸试验测试得到的失效塑性应变为 0.4，纯剪切试验的失效塑性应变为 0.564，纯压缩试验的失效塑性应变为 0.830，忽略 D_4 和 D_5（均设为 0）。则可列方程如下：

$$\left[D_1+D_2\exp\left(\frac{1}{3}D_3\right)\right]=0.4$$

$$\left[D_1+D_2\right]=0.564$$

$$\left[D_1+D_2\exp\left(-\frac{1}{3}D_3\right)\right]=0.830$$

可求得 $D_1=0.246$，$D_2=0.3$，$D_3=-2$。则该材料的失效塑性应变−应力三轴比σ^*曲线的形式如图 16−11 所示。

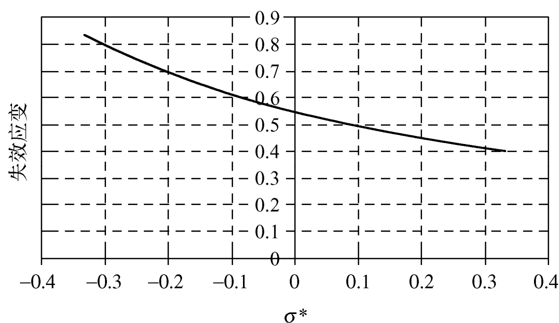


图 16−11　材料的失效塑性应变−应力三轴比σ^*曲线

如果有条件，增加每种试验的动态测试，则可将应变率效应包含进去，得到参数 D_4。

对于参数 D_5，则需要增加温度软化相关测试。

同时，由上例可以看出，与单一的拉伸失效模型相比，Johnson−Cook 失效模型使用应力三轴比以包含更全面的应力状态，使其适用范围更广，这也是该失效模型广泛应用的原因之一。

16.5.2 玻璃

玻璃、铸铁、铸铝、陶瓷、部分聚合物（如聚丙乙烯等）是典型的脆性材料（延性金属在低温下也会表现出脆性），人们往往会认为这种材料在失效破坏前仅有很微小的变形，可能还处于弹性范围内。而事实上却不一定如此，玻璃的力学行为并不是这样，在失效破坏（碎裂现象）时，它已经产生了塑性应变，其主要破坏机理是拉伸应变失效。

在对玻璃进行有限元建模时，需要根据实际情况（主要是料厚与部件尺寸的相对关系）来选择合适的单元类型。如果料厚远小于平面尺寸，建议使用 Shell 单元（QEPH 公式）。如果料厚与其他两个尺寸相当，则建议使用全积分的 Solid 单元（HA8）。玻璃的材料则可以选择各向同性的弹塑性材料模型，如 LAW36、LAW2、LAW44、LAW27 等。

如上所述，玻璃的失效主要是拉伸破坏，其拉伸失效值远比剪切失效值和压缩失效值小，因此可以使用考虑拉伸失效的失效模型，如/FAIL/TENSSTRAIN 和/FAIL/FLD，或者直接使用材料模型里自带的失效模型，如使用 LAW27。

内含塑料膜的夹层玻璃，可以使用夹层 Shell 公式（SH_SAND）来定义各层的厚度和相应的材料，失效模型与材料模型的自由组合可以保证整个夹层玻璃建模的高度灵活性。

16.5.3 泡沫、橡胶、弹性体

除天然橡胶只表现出较纯粹的超弹性行为外，大部分合成橡胶与发泡泡沫材料均表现出较明显的粘弹性。对于天然橡胶类的超弹性材料，可以使用 LAW42、LAW62、LAW82 或 LAW69，而相应的 Solid 单元公式则建议使用 HEPE 单元（I_{solid}=24）及全拉格朗日总应变公式（I_{smstr}=10）。

工业上常用的泡沫材料，如汽车座椅用泡沫、发泡聚丙酯（EPP）泡沫、聚氨酯（PU）泡沫、聚氯乙烯（PVC）泡沫、有机硅泡沫等，均可使用 LAW70 建模（详见 16.25）。而其加载和卸载应力-应变曲线，通常采用标准试块压缩试验获得。

工业上广泛使用的热塑性弹性体，则建议使用 LAW65 建模，请详见 16.2.4。

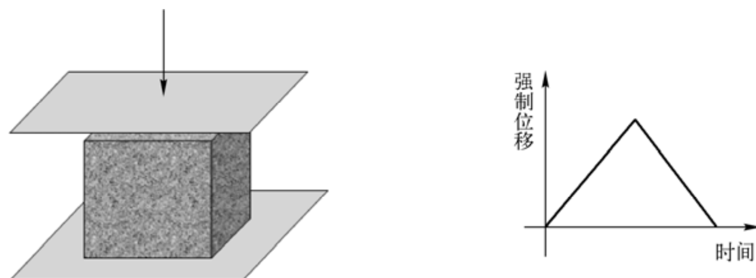


图 16−12　泡沫压缩试验

16.5.4 复合材料

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质采用适当的工艺组合而成的多相固体材料。自从航空航天工业为它的发展提供了最初的驱动力以来，其应用日趋广泛。现代航空器的设计已经将复合材料含量作为性能先进性的重要指标之一，国防工业的特殊要求也将复合材料（尤其是先进复合材料）的研究和应用推向新的高度，民用工业领域对复合材料的研究和应用也在不停升温。由于复合材料是一门正在飞速发展的单独学科，限于本书的结构安排和篇幅，本节将仅对 RADIOSS Block 里复合材料的建模进行基础性概述。详细技术请与 Altair 工程软件（上海）有限公司联系，网址为 www.altair.com.cn，电子邮箱为 info@altair.com.cn。

混合复合材料（纤维增强结构）可使用 Solid 单元建模。层合复合材料则可以有三种建模策略，如图 16-13 所示。

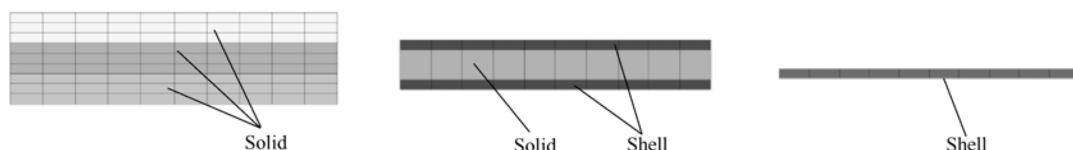


图 16-13 层合复合材料的三种网格模型

每一层均使用至少一层 Solid 单元，层之间采用共节点处理（不考虑层之间的层离）或采用带失效定义的绑定接触处理（Interface Type2，Spotflag=20,21,22）。这种方法精度高，但模型规模大，计算消耗高。

对于芯层较厚的情况，也可以对上下薄层使用 Shell 单元建模，仅保留较厚的 Solid 单元层。层之间的处理同第一种方法。这种方法精度高，模型规模有所减小。

使用夹层板壳/PROP/TYPE11 (SH_SANDW)，厚度方向仅有一层 Shell 单元，这种 Shell 单元公式可以定义厚度方向 *N* 个不同的材料层。其精度高，模型规模小，层离失效由单元算法、材料模型及失效模型定义。

表 16-28 显示了 RADIOSS Block 里可用于层合复合材料建模的单元公式。

表 16-28 可用于层合复合材料建模的单元公式

单元属性卡	类 别	注 释
/PROP/TYPE9 (SH_ORTH)	正交各向异性 Shell	一层材料，两个方向
/PROP/TYPE10 (SH_COMP)	复合材料 Shell	*N* 层材料： 每层是正交各向异性，两个方向 每层的材料方向不一样 各层等厚（总厚度/N）
/PROP/TYPE11 (SH_SANDW)	夹层 Shell	*N* 层材料： 每层是正交各向异性，两个方向 每层的材料方向不一样 各层不等厚 各层材料不一样
/PROP/TYPE22 (TSH_COMP)	复合材料 Thick Shell	Plys and Stacks： 每层材料及其方向不一样 每层厚度不一样（只需要定义厚度比例） 可以模拟层间层离失效

RADIOSS Block 里可用于复合材料建模的材料模型如表 16–29 所示：

表 16–29　复合材料可用的材料模型

类　别	材料卡片	注　释
复合材料	/MAT/LAW27 (PLAS_BRIT)	弹塑性脆性材料
	/MAT/LAW36 (PLAS_TAB)	表格式分段线性弹塑性材料
	/MAT/LAW15 (CHANG)	Tsai-Wu 塑性 ＋Chang-Chang 失效模型
	/MAT/LAW25 (COMPSH)	Tsai-Wu 塑性材料
	/MAT/LAW12 (3D_COMP)	复合实体材料
织物	/MAT/LAW19 (FABRI)	线弹性正交各向异性织物
	/MAT/LAW58 (FABR_A)	非线性弹性各向异性织物

对于复合材料可用的失效模型，理论上，能与所用的单元公式和材料模型同时兼容，则该失效模型就可以用在该材料模型上。经常用于复合材料的失效模型除了 LAW15 自带和 16.4.6 介绍过的 Chang-Chang 失效模型外，还有 Hashin 复合材料失效模型（/FAIL/HASHIN）、Ladeveze 复合材料层离失效模型（/FAIL/LAD_DAMA）、Puck 复合材料失效模型（/FAIL/PUCK）等。

16.6　RADIOSS Block 材料与失效模型应用实例

16.6.1　实例教程——橡胶衬套组合负载变形分析

本教程示范了一个橡胶衬套在系列载荷作用下的变形分析，如图 16–14 所示。给定载荷顺序如下：横向移动 10mm，之后再纵向移动 5mm，最后沿心轴扭转 20°。

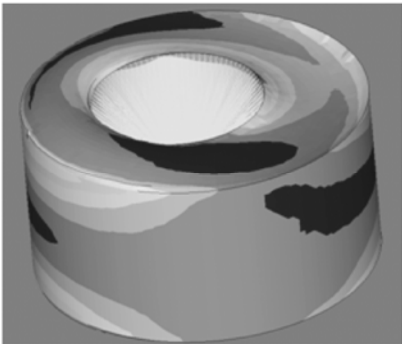


图 16–14　橡胶衬套变形分析

模型单位制：长度（mm），时间（ms），质量（kg），集中力（kN）和应力（GPa），整个作用时间为 1.5ms，各步载荷时间为 0.5ms。衬套尺寸为厚度 100mm，外圆直径 200 mm，内圆直径= 50mm。外圆表面被约束住所有的移动自由度（V_X，V_Y，V_Z），中心节点被约束住 X 方向的移动自由度以及 X 和 Y 方向的转动自由度（V_X，W_X，W_Y）。

模型使用的橡胶材料模型为 /MAT/LAW42（Rubber），其参数如下：

$\rho = 6.0^{-6}$ kg/mm^3　　　[Rho_I] 密度

$\upsilon = 0.495$ [nu] 泊松比

$\mu_1 = 0.175\text{GPa}$ [mue1]

$\alpha_1 = 2$ [alfa1]

$\alpha_2 = -2$ (alfa2)

STEP 01 载入 RADIOSS（Block）用户配置

（1）启动 HyperMesh。

（2）从 Preferences 菜单中选择 User Profiles 或在工具栏中单击按钮。

（3）选择 RADIOSS（Block100）并单击 OK。

STEP 02 载入 gasket.hm 文件

（1）在工具栏中，单击 Open Model 按钮并浏览至目标文件夹选择 gasket.hm 文件。

（2）单击 Open，模型被载入至图形区域。

STEP 03 定义并指定材料和属性给零件 Gasket

（1）从 Model Browser 中选择零件 Gasket，然后右键单击选择 Edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Material 标签创建材料。

（4）确认选中 Assign material。

（5）在 name 文本框中输入 rubber。

（6）对于 type 选择 ELASTIC，对于 card image 选择 M42_OGDEN 并单击 Create Material。

（7）输入卡片值如图 16-15 所示 Rho_I=6.000e-6，Nu=0.495，mul=0.600，alphal=2.000，alpha2=-2.000。

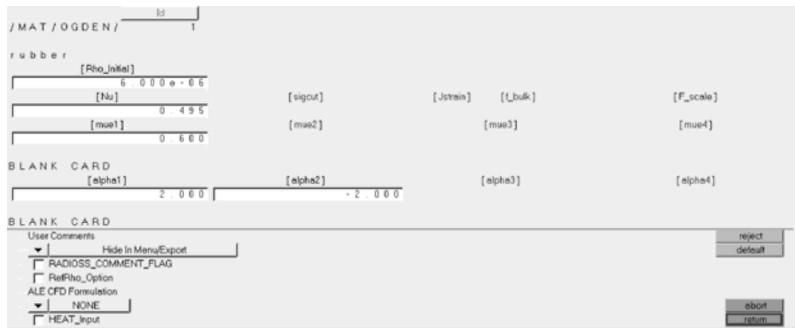


图 16-15 Ogden 材料定义

（8）单击 return 返回至 component 对话框。

（9）单击 Property 标签创建属性。

（10）在 name 文本框中输入 Gasket；对于 type 选择 VOLUME。

（11）对于 card image，选择 P14_SOLID 并单击 Create Property。

（12）设置 Isolid 为 24。

（13）单击 return 返回至 component 对话框。

（14）单击 update 更新零件。

STEP 04 为衬套中心的刚体创建一个零件

（1）在 Model Browser，右键单击并选择 Create→Components。

（2）在 name 文本框中输入 Center 并设置 card image 为 none。

（3）选择一种颜色。

（4）单击 create。

（5）单击 return 退出当前面板。

STEP 05 在衬套中心创建一个刚体

（1）进入 1D 页面，选择 rigids 面板。

（2）对于 nodes 2-n，设置为 multiple nodes。

（3）对于 primary node，设置为 calculate node。

（4）单击 nodes 并在内表面选择一个节点。

（5）单击 nodes 并选择 by face。

（6）HyperMesh 将会选择内表面上所有的节点。

（7）单击 create。

（8）单击 return 退出当前面板，完成衬套中心刚体的创建，如图 16-16 所示。

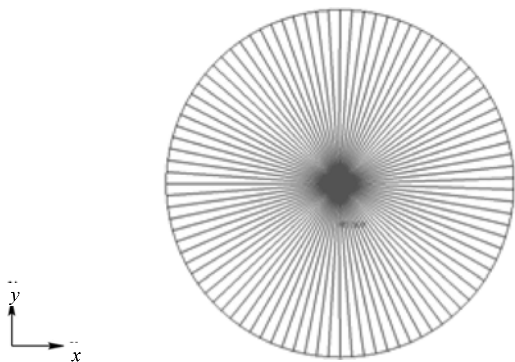


图 16-16　创建衬套中心刚体

STEP 06 创建衬套内表面固定边界条件

（1）从 Utility 页面启动 BC’s Manager。

（2）对于 Name，输入 Inner_BC，设置 Select type 为 Boundary Condition 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）选择 STEP 05 中创建的刚体的主节点。

（4）选中 Tx 移动自由度和 Rx、Ry 转动自由度，如图 16-17 所示。

（5）单击 create 创建内表面固定边界条件。

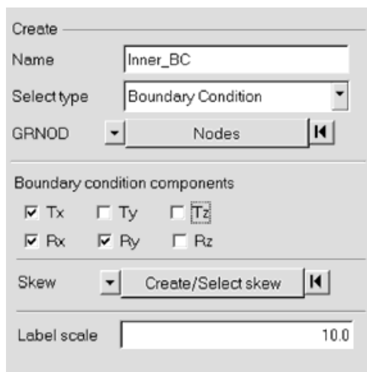


图 16-17　创建内表面固定边界

STEP 07 创建内表面 Y 方向位移边界条件

（1）从 Utility 页面启动 BC's Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 DISP_Y，设置 Select type 为 Imposed Displacement 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）选择 STEP 05 中创建的刚体的主节点。

（4）设置 Direction 为 Y，如图 16-18a 所示。

（5）单击 Create/Select curve 打开 XY curve editor。

（6）单击 new 并在 Name 文本框中 DISP_Y。

（7）输入以下值：$x = \{0, 0.5, 1.0\}$，$y = \{0, 10, 10\}$。

（8）单击 update 并关闭 XY curve editor 界面。

（9）单击 create 创建边界条件。

STEP 08 创建衬套内表面 Z 方向位移边界条件

（1）从 Utility 页面启动 BC's Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 DISP_Z，设置 Select type 为 Imposed Displacement 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）选择 STEP 05 中创建的刚体的主节点。

（4）设置 Direction 为 Z，如图 16-18b 所示。。

（5）单击 Create/Select curve 打开 XY curve editor。

（6）单击 new 并在 name 文本框中 DISP_Z。

（7）输入以下值：$x = \{0, 0.5, 1, 1.5\}$，$y = \{0, 0, 5, 5\}$。

（8）单击 update 并关闭 XY curve editor 界面。

（9）单击 create 创建边界条件。

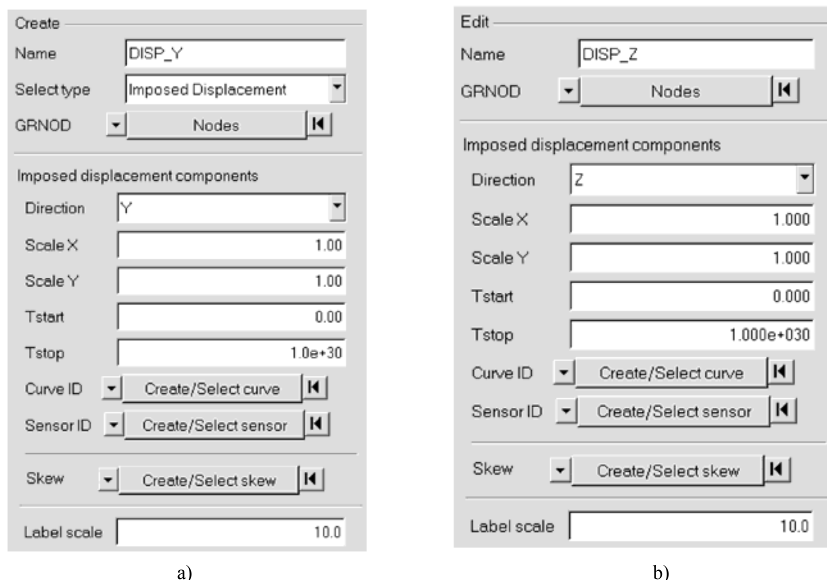


图 16-18　创建内表面 Y 和 Z 方向位移边界条件

STEP 09　创建内表面 Z 方向转动边界条件

（1）从 Utility 页面启动 BC’s Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 ROT20DEG_Z，设置 Select type 为 Imposed Displacement 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）选择 STEP 05 中创建的刚体的主节点。

（4）设置 Direction 为 ZZ，如图 16-19a 所示。

（5）单击 Create/Select curve 打开 XY curve editor。

（6）单击 new 并在 Name 文本框中 ROT20DEG_Z。

（7）输入以下值：$x = \{0, 1, 1.5, 2\}$，$y = \{0, 0, 0.349, 0.349\}$。

（8）单击 update 并关闭 XY curve editor 界面。

（9）单击 create 创建边界条件。

STEP 10　创建外表面固定边界条件

（1）从 Utility 页面启动 BC’s Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 OUTER_BC，设置 Select type 为 Boundary Condition 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）单击 Nodes 并选择外表面上的一个节点。

（4）单击 Nodes 然后选择 by face 以选择外表面上所有的节点。

（5）选中所有的移动和转动自由度，如图 16-19b 所示。

（6）单击 create 创建外表面固定边界条件。

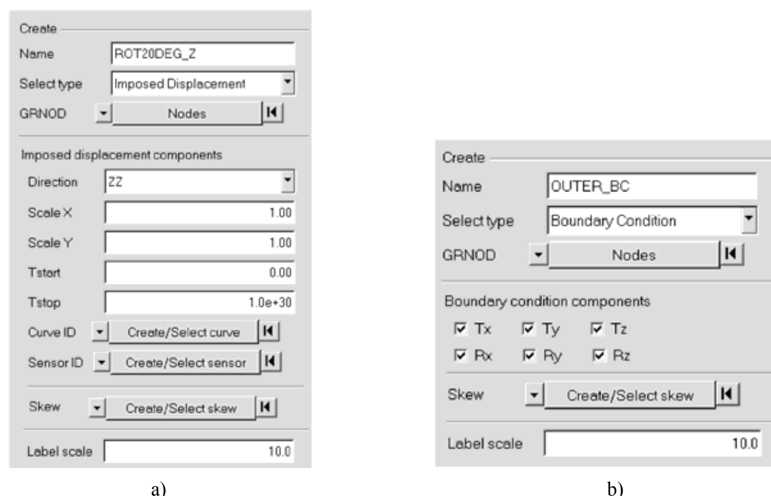


图 16-19　创建内表面 *Z* 方向转动边界条件和外表面固定边界条件

STEP 11 创建输出请求和控制卡片

（1）在 Utility 菜单中选择 RADIOSS Tools，然后选择 Engine File。

（2）Radioss Engine File Tool 窗口弹出，在 GENERAL、ANIM 窗口中输入，如图 16-20 和图 16-21 所示的值。

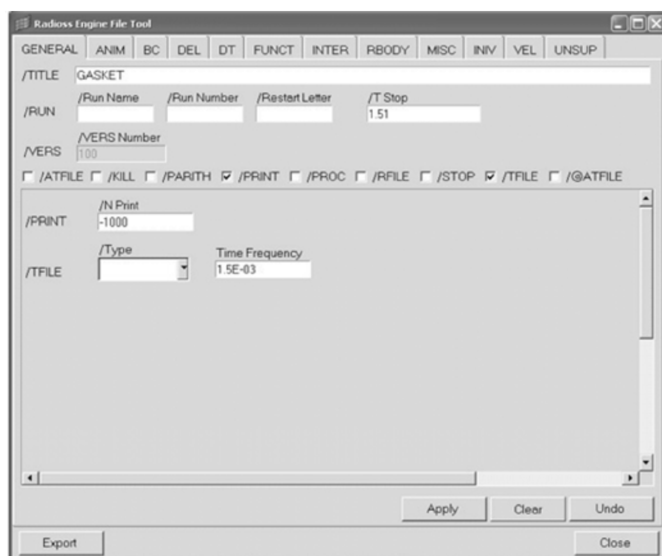


图 16-20　定义 GENERAL 面板

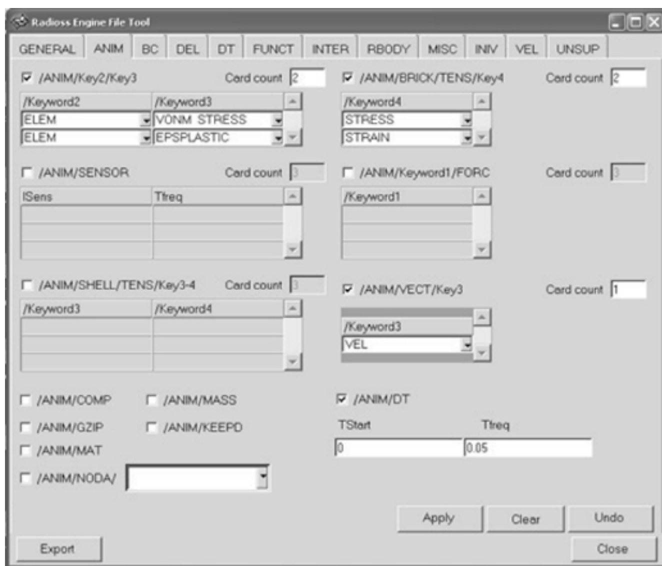


图 16-21　定义 ANIM 面板

STEP 12　导出模型

（1）从 File 下拉菜单中单击 Export 或者单击 Export 按钮（对于 standalone）或者按钮(对于 HyperWorks Desktop)。

（2）对于 File，单击文件夹按钮（对于 standalone）或者按钮（对于 HyperWorks Desktop）并浏览至想保存的路径。

（3）在 name 文本框中输入 gasket 并单击 Save。

（4）单击 Export options 旁边的向下按钮展开面板。

（5）单击 Merge starter and engine file 以导出一个完整的求解文件。

（6）单击 Export 导出求解文件。

STEP 13　打开 RADIOSS Manager 进行求解

（1）进入 Start→Programs→Altair HyperWorks 11.0→RADIOSS。

（2）对于 Input file（s），浏览至之前保存的路径并选择文件 gasket_0000.rad。

（3）单击 Run 提交求解，如图 16-22 所示。

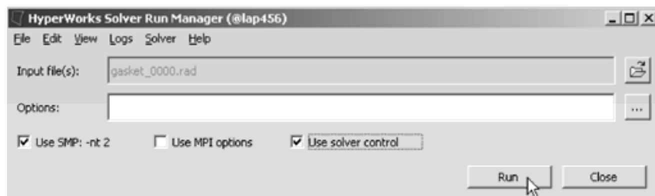


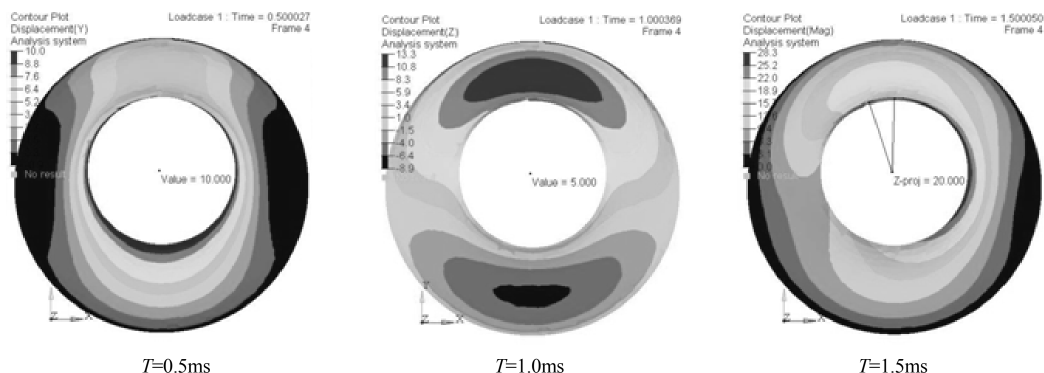
图 16-22　打开 RADIOSS Manager 进行求解

STEP 14 查看输出文件并检查结果

（1）查看.out 文件中是否有警告或错误。

（2）使用 HyperView 绘制位移云图，如图 16-23 所示。

（3）绘制应力云图，如图 16-24 所示。



T=0.5ms　　*T*=1.0ms　　*T*=1.5ms

图 16-23　不同时刻的位移云图

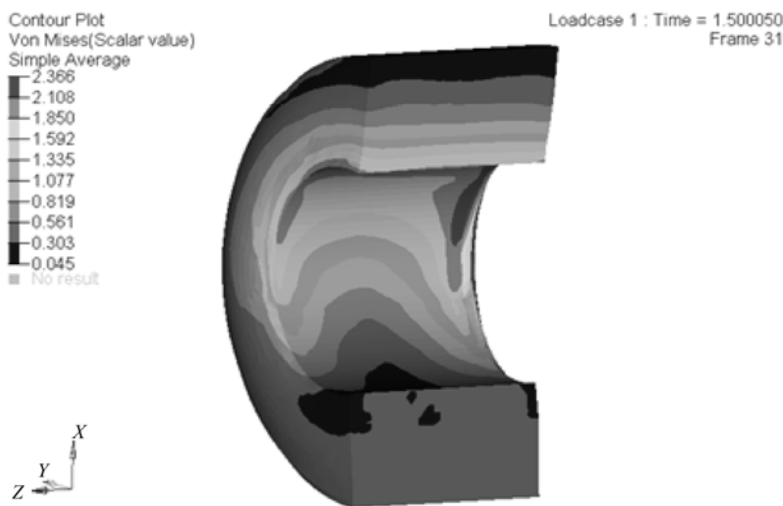


图 16-24　最终的应力云图

16.6.2 实例教程——泡沫块钢球冲击模拟

本教程通过泡沫块受钢球冲击过程的仿真模拟，演示如何使用 RADIOSS Block LAW70 进行粘弹性材料的建模，以及如何输出冲击反力，模型如图 16-25 所示。本教程的要点是如何定义粘弹性材料和刚度相差很大的部件之间的接触的定义技巧。

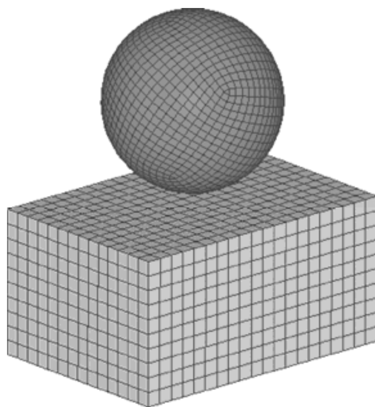


图 16-25　泡沫块钢球冲击

STEP 01 启动 HyperMesh 并加载 RADIOSS 求解器模板

（1）在开始菜单中选择所有程序，并选择 HyperMesh。

（2）在 User Profiles 中，选择 RADIOSS 模板并选择 Block100 格式。

（3）打开练习文件 Drop on Foam.hm。

STEP 02 为钢球创建材料和单元类型

（1）在页面上方的 Materials 下拉菜单中，选择 Create。

（2）在弹出的 Create material 窗口的 Type 中选择 ELASTO-PLASTIC，在 Name 文本框中输入 material1，Card image 选择为 M2_PLAS_JOHNS_ZERIL，如图 16-26 所示。

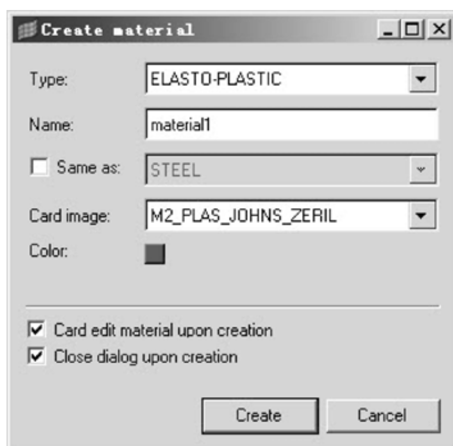


图 16-26　创建钢球的材料

（3）单击 Create。

（4）在弹出的材料属性输入窗口中，按图 16-27 所示内容填入钢的材料参数。

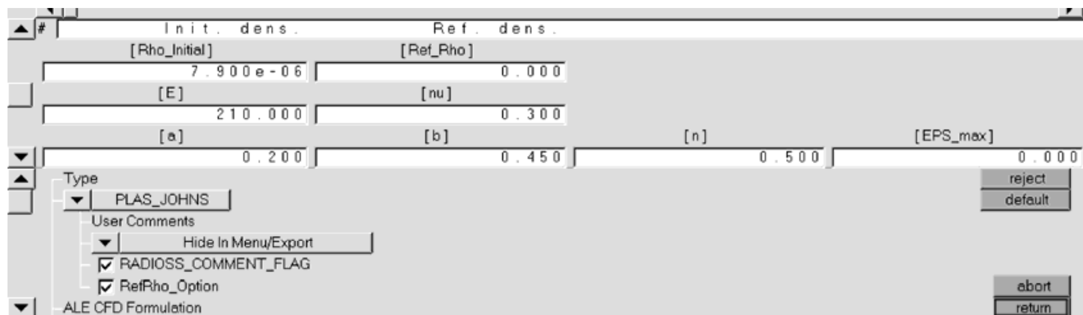


图 16-27　钢球材料卡片

（5）在主菜单的 Properties 下拉菜单中，选择 Create，Properties。

（6）在弹出的单元类型输入窗口的 Type 中选择 SURFACE，在 Name 文本框中输入 PSHELL648，在 Card image 中选择 P1_SHELL，如图 16-28 所示。

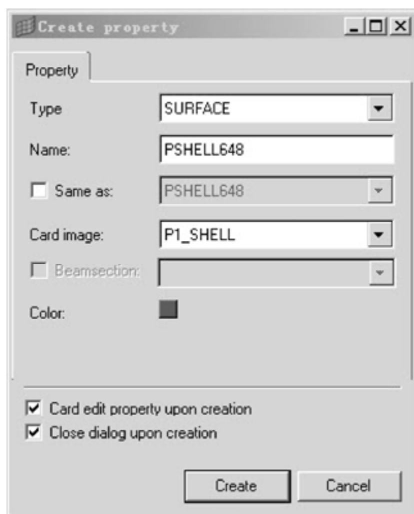


图 16-28　创建钢球的 Shell 属性

（7）单击 Create。

（8）在弹出的单元类型编辑窗口中，按图 16-29 所示内容，输入 Shell 单元的相关属性。

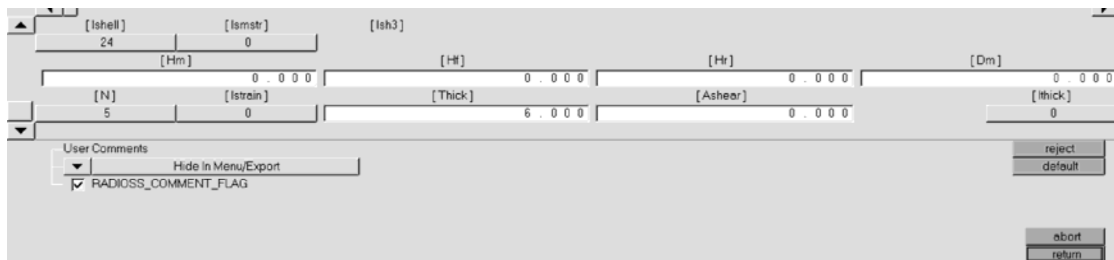


图 16-29　钢球 Shell 单元属性卡片

（9）单击 return，完成单元类型的创建。

STEP 03 为钢球创建 Part 信息

（1）单击工具栏中的 Part 按钮。

（2）在弹出的界面中，选中 update。

（3）在 component 中选择 component Sphere。

（4）在 card image 中选择 Part。

（5）在 Property 中选择 PSHELL648。

（6）在 Material 中选择 material1。

（7）单击 Update 完成 Part 创建。

STEP 04 为泡沫材料创建材料模型

（1）在 HyperMesh 下拉菜单中选择 Materials，并单击 Create。

（2）在弹出的材料创建窗口中，创建名为 Foam 50g 的泡沫材料，材料类型为 VISCO-ELASTIC，Card image 为 MLAW70，并单击 Create，如图 16-30 所示。

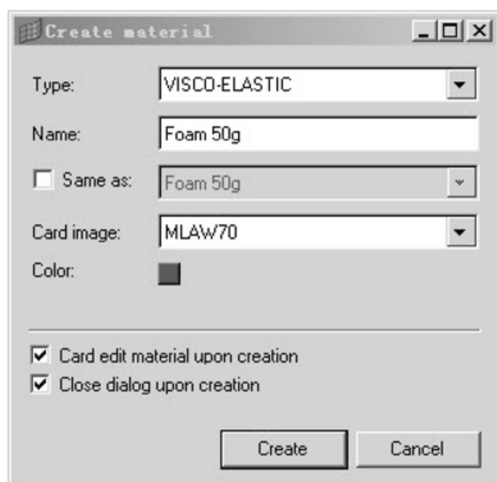


图 16-30　创建泡沫材料

（3）在弹出的材料属性编辑面板下，按图 16-31 所示的内容填入参数。

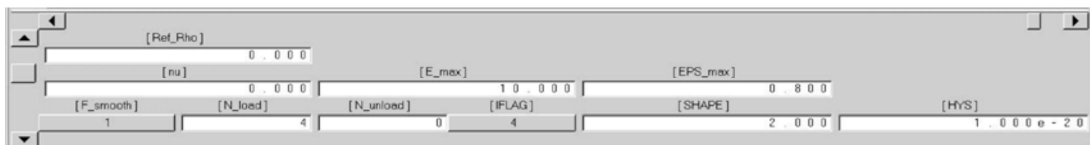


图 16-31　泡沫材料卡片

（4）要特别注意，使用 MATLAW70 模拟泡沫材料时，需要考虑其在不同应变率效应下的应力-应变特性。在本教程里，定义了不同应变率的曲线，在预读入的 Drop on Foam.hm 文件中，除了网格模型外，还包括 4 条曲线，如图 16-32 所示。



图 16-32　已定义的 4 条曲线

其中，曲线 Foam、Foam.1 和 Foam.2 将被用于定义该泡沫材料在不同应变率条件下的应力-应变关系。

（5）在该材料属性定义面板下，分别在 load_fID（*n*）中选择前 3 条曲线，并输入应变率值以及相应的曲线缩放因子，如图 16-33 所示。

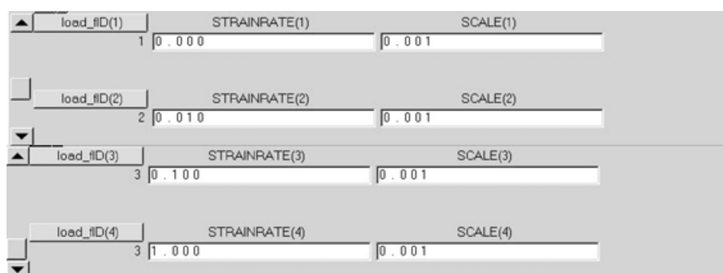


图 16-33　泡沫材料卡片曲线指定

（6）完成应力-应变关系的定义后，单击 return，退出材料模型定义面板。

STEP 05　为泡沫块选择单元类型

（1）在 HyperMesh 下拉菜单中选择 Properties，然后选择 Create。

（2）在弹出的单元类型面板的 Type 中选择 VOLUME，在 Name 文本框中填入 SOLID_SM，在 Card image 中选择 P14_SOLID，然后单击 Create。如图 16-34 所示。

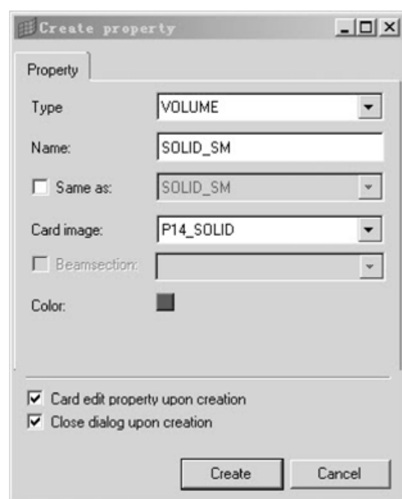


图 16-34　创建泡沫块 Solid 属性卡

（3）按图 16-35 所示内容编辑实体单元卡片数据，并单击 return。

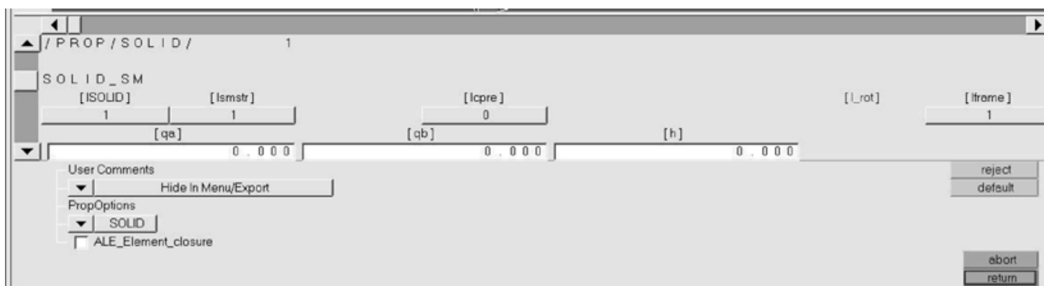


图 16-35　泡沫块 Solid 属性卡

STEP 06 为泡沫块创建 Part 信息

（1）按照 STEP 03 中的方法，在工具栏中单击 Component 按钮。

（2）选中 Update。

（3）在 component 中选择 solid。

（4）在 Property 中选择 SOLID_SM。

（5）在 Material 中选择 Foam_50g。

（6）单击 Update，完成 Part 信息的创建。

STEP 07 创建刚性墙

（1）在 Analysis 面板中选择 rigid walls 子面板，选中 create 单选按钮，在 name 文本框中输入刚性墙的名称 ground，单击 create 后停留在这个子面板，如图 16-36 所示。



图 16-36　创建刚性墙

（2）切换到 geom，将 shape 切换成 infinite plane，单击 base node，弹出节点 ID 选择框，输入 523 后按〈Enter〉键，normal vector 切换成 y-axis，如图 16-37 所示。



图 16-37　定义刚性墙的法向

（3）切换到 add，在 dist 文本框中输入 50，单击 update，如图 16-38 所示。



图 16-38　定义刚性墙的从节点

（4）单击 review 按钮，可在图形区预览刚性墙及其从节点，单击 return 返回。

STEP 08 在球体和泡棉块间定义接触

为了正确描述球体在跌落后与泡沫块间的接触过程，需要分别在球体的所有节点和泡沫块实体单元的表面间以及泡沫块的所有节点和球体表面的壳单元之间建立接触。在读入的 Drop on Foam.hm 文件中，已经包含了完整定义的各类 set，包括钢球表面的所有节点集以及泡沫块的实体表面等。在建立接触对的过程中，只需要正确调用即可。

（1）在 Analysis 面板的 interface 面板下建立接触，将该接触对命名为 sphere-foam，在 type 中选择 TYPE7，creation method 也为 TYPE7，单击 create，创建接触，如图 16-39 所示。

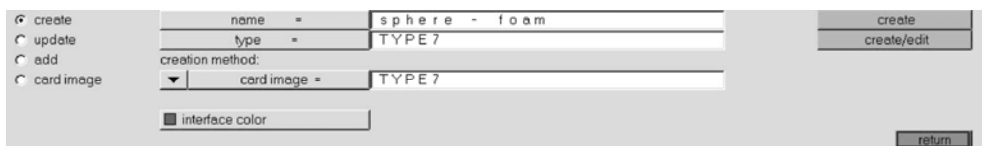


图 16-39　创建 Interface Type7

（2）然后选中 add 单选按钮，为该接触对添加主和从对象。将 master 设置为 sets，单击 sets 按钮，在弹出的列表中选择 Foam.3。单击 update。

（3）将 slave 设置为 sets，单击 sets 按钮，在弹出的列表中选择 sphere，单击 update。

（4）单击 review，如果在视图区域中，模型显示切换为图 16-40 所示的颜色，那么即表示接触对正确建立。其中，高亮的单元和高亮的节点分别表示接触的主从关系。

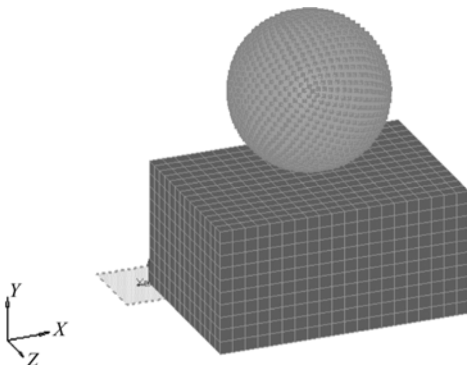


图 16-40　预览 Interface Type7

（5）切换到 card image 子菜单，单击 edit，进入接触对属性设置面板，按图 16-41 所示的内容填入相关参数。

```
                     id
/INTER/TYPE7/        5

sphere - foam
 Radioss_Comment
#
gmod_id   surf_id   [Istf]   [I_the]   [Igap]   [Multimp]   [Ibag]   [Idel]
   26        25        4                  0          4          0        0
      [Gap_Scale]          [Gap_max]
          0.000               0.000
      [STMIN]              [STMAX]
          0.000               0.000
      [STFAC]              [FRIC]              [GAPmin]            [Tstart]
          0.000               0.400               1.000               0.000
        000                        [INACTI]      [VIS_S]             [VIS_F]
                                       0            0.000               0.000
  [Ifric]     [Ifiltr]        [Xfreq]         [Iform]
     0           0              0.000            2
```

图 16-41　编辑 Interface Type7 卡片

（6）不退出 interface 面板，再创建名为 sphere-foam.1 的接触对，其接触类型为 TYPE7。

（7）进入 add 子菜单，为该接触对添加主从对象。

（8）将 master 设置为 sets，单击 sets 按钮，在弹出的列表中选择 sphere.4，然后单击 update。

（9）将 slave 设置为 sets，单击 sets 按钮，在弹出的列表中选择 Foam，然后单击 update。

（10）单击 review，视图区域中显示的接触对信息应与步骤（4）中建立的接触对相反，如图 16-42 所示。

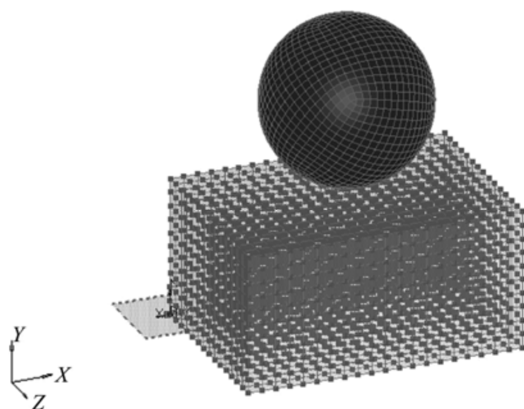


图 16-42　预览定义的对称接触

（11）切换到 card image 子菜单，单击 edit，采用与步骤（5）相同的方法设置接触对 sphere-foam.1 的卡片。

STEP 09 为球体的刚心创建约束

（1）在 Utility 面板下，选择 BC's Manager。
（2）在 Name 文本框中输入 sphere。
（3）在 Select Type 中选择 Boundary Condition。
（4）将 GRNOD 的选择对象设置为 GRNOD（set）并单击，选择对象为 sphere_2。
（5）在 Boundary Condition components 中，选中 Tx、Tz、Rx、Ry、Rz。保留 Ty 不选中。
（6）其他参数保持不变。
（7）单击 Create，在模型中建立了球体刚心的约束。要求该球体的刚心只能沿平行于 *Y* 轴的方向运动。

STEP 10 创建重力载荷

（1）继续停留在 BC's Manage 面板中。
（2）在 Name 文本框中输入 sphere.1。
（3）在 Select Type 中选择 Gravity Load。
（4）将 GRNOD 的选择对象设置为 GRNOD（set）并单击，选择对象为 sphere_1.2。
（5）将载荷的方向设置为 *Y* 轴，并在 Scale Y 中输入 7.0（这里定义了 7g 的加速度）。
（6）单击 Create。
（7）在模型中，建立了钢球的重力载荷。分析开始后，钢球将在重力的作用下，沿平行于 *Y* 轴的方向进行自由落体运动。

STEP 11 求解控制卡片定义

（1）进入 Analysis 面板的 control crad 子面板。
（2）在 MemoryReq 卡片中的 NMOTS 文本框中输入 25 000，在 REAL 文本框中输入 0。
（3）在 SPMD 卡片的 DOMDEC 中选择 0，在 Nproc 文本框中输入 0，在 Dkword 文本框中输入 0。
（4）在 IOFLAG 卡片中，除了 OUTYY 设置为 2 外，其他全部设置为 0。
（5）在 AnalysisFlag 卡片中，将 N2D3D、IPARITH、ISUBCYC 全部设置为 0。
（6）在 SolidDefault 中，设置 Isolid 和 Ismstr 为 0。
（7）在 ShellDefault 中，将 Ish3n 设置为 1，其他参数全部设置为 0。

STEP 12 输出定义

（1）在 Output Block 中，创建名为 solid 的卡片。

（2）在 group 中，选择 sphere-foam。

（3）单击 create。

（4）在 NUM_VARIABLES 中选择 1，在 VAR 文本框中输入 DEF。

（5）单击 return。

（6）回到 Output Block 界面中，创建名为 new_rwall_plane 的卡片。

（7）在 groups 中，选择刚性墙 ground。

（8）单击 create。

（9）在 NUM_VARIABLES 中选择 1，在 VAR 文本框中输入 DEF。

（10）单击 return 回到上级菜单，完成 Output Block 的定义。

STEP 13 输出求解文件

（1）在 HyperMesh 的求解器文件输出功能中，输出名为 Foam 的 RADIOSS Block 求解文件，选中 Export Engine File。事实上 Engine File 的内容将在下面的步骤中手工编辑完成。

（2）可以看到，在工作文件夹下生成了名为 FOAM_00_0000 的 Starter File 和名为 FOAM_00_0001 的 Engine File。此时，Engine File 中还不包含任何内容。

（3）使用文本编辑器，打开该 Engine File，编辑文件使其为下列内容：

```
#
/TITLE
FOAM TEST without rigid
/VERS/51
/DT/NODA/CST
6.700000e-001 5.000000e-004
/ANIM/DT
0.000000e+000 2.000000e-000
/TFILE
1.000000e-001
/PRINT/1000
/RUN/FOAM_00/1
15.001000e+001
/ANIM/ELEM/ENER
/ANIM/ELEM/EPSP
/ANIM/ELEM/HOURG
/ANIM/ELEM/VONM
/ANIM/NODA/DT
/ANIM/NODA/DMAS
/ANIM/MASS
#
/ANIM/BRICK/USR2
/ANIM/BRICK/USR3
/ANIM/BRICK/USR4
```

```
/ANIM/BRICK/USR6
/ANIM/BRICK/USR7
#
/RBODY/ON
 6144
/PARITH/ON
/MON/ON
```

STEP 14 使用 HyperView 查看结果

（1）求解完成后，在 HyperView 里查看结果，作剖切视图，并观察动画，如图 16-43 所示。

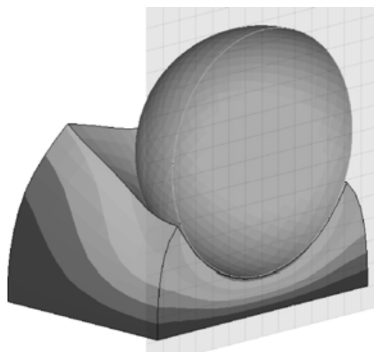


图 16-43　剖切的位移云图

（2）求解完成后，在 HyperView 里使用 HyperGraph2D 打开 T01 时间历程数据，查看地面（刚性墙）受力曲线，结果如图 16-44 所示。

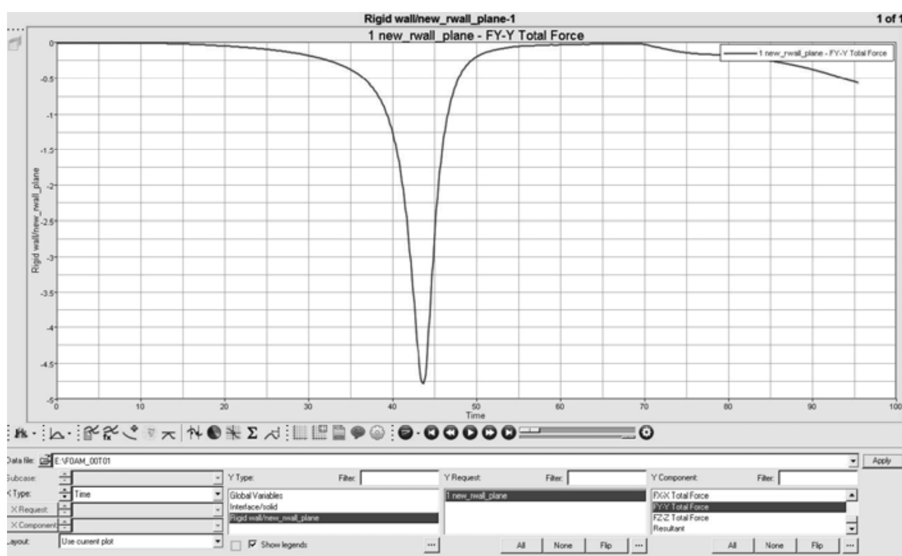


图 16-44　地面（刚性墙）受力时间历程曲线

16.6.3 实例教程——复合材料梁三点弯曲分析

本教程对一个沿 *Y* 向对称的复合材料梁进行三点弯曲分析，如图 16-45 所示。模型使用的基本单位是 mm、s、t。下部两个圆管形支撑完全固定，中间的圆管形压头沿 *Z* 向向下运动，速度为 1 000mm/s。分析时间为 0.07s。由于模型具有对称性，因此仅取一半结构进行分析。

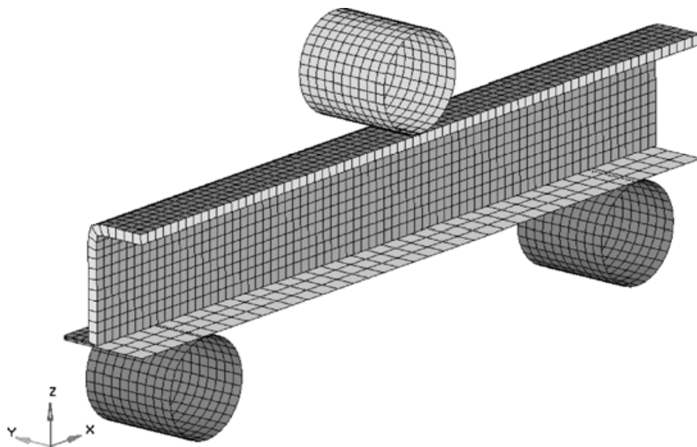


图 16-45　复合材料梁弯曲模型

梁结构的内芯是蜂窝材料块体，内外覆层是金属，材料参数如下。

蜂窝材料（HONEYCOMB），使用 LAW28：

$\rho = 3.0\times10^{-10}$ t/mm^3	[Rho_I]初始密度
$E_{ij} = 200$MPa	[E11]、[E22]和[E33]杨氏模量
$G_{ij} = 150$MPa	[G11]、[G22]和[G33]剪切模量

分段线性弹塑性材料，Inner，Outer，Flat，LAW36：

$\rho = 7.85\times10^{-9}$ t/mm^3	[Rho_I]初始密度
$E = 210\ 000$MPa	[E]杨氏模量
$\upsilon = 0.29$	[nu]泊松比

其真实应力-塑性应变曲线参数如表 16-30 所示。

表 16-30　真实应力-塑性应变曲线参数

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
应变	0	0.010	0.013	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045
应力	300	310	320	330	340	350	360	370	380	400

弹塑性材料， Impactor ，LAW2：

$\rho = 8\times10^{-9}$ t/mm^3	[Rho_I]初始密度
$E = 208\ 000$MPa	[E]杨氏模量
$\upsilon = 0.29$	[nu]泊松比

本教程按照前处理过程的不同，分为两部分，第一部分基于 HyperCrash 完成前处理，第二部分则是基于 HyperMesh 完成前处理过程的。请读者在学习复合材料、蜂窝材料建模技术的同时，注意学习两个前处理模块不同的操作步骤。

1．基于 HyperCrash 的建模过程

STEP 01 导入 RADIOSS 网格

（1）打开 HyperCrash 11.0。

（2）在 User profile 中选择 RADIOSS V9。

（3）在 Unit system 中选择 N mm s T。

（4）选择 User interface style 为 New。

（5）单击 Run。

（6）在菜单栏中选择 File→Import→RADIOSS。

（7）在文件输入窗口中，选择相应路径下的 BENDING_0000.rad。

（8）单击 OK。

STEP 02 创建并赋予材料

（1）从下拉菜单中选择 Model→Material。

（2）在 Choose Material Law 中，单击 RADIOSS→Elastic→Linear elastic (1)，如图 16-46 所示。

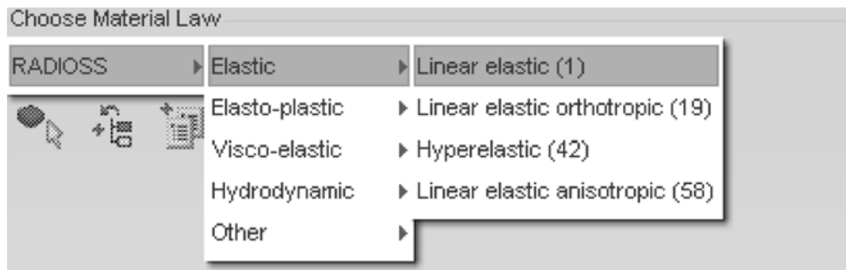


图 16-46　进入材料创建界面

（3）在 Title 文本框中输入 Rigid Material，输入图 16-47 所示的材料参数。

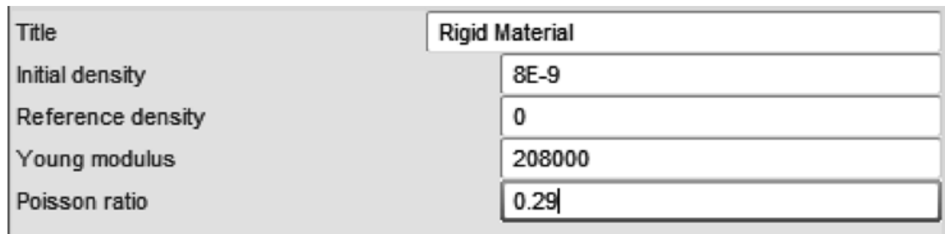


图 16-47　定义材料卡片

（4）单击 Include picked parts 按钮 并在图形显示区域选择 Impactor 与 Support 部分。

（5）单击右下角的 Yes。

（6）单击 Save。

STEP 03 为 Inner、Outer 和 Flat 创建并赋予材料

（1）在 Choose Material Law 中，单击 RADIOSS→Elasto-plastic→Piecewise linear（36）。

（2）在 Title 文本框中输入 Shell Material。

（3）输入图 16-48 所示的材料参数。

Title	Shell Material
Initial density	7.85E-9
Reference density	0
Young modulus	210000
Poisson coeff.	0.29
Maximum plastic strain	0
Tensile rupture strain	0
Tensile rupture strain	0
Hardening coeff	0
☐ Strain rate smoothing	
Cutoff frequency for smoothing	0
Maximum tensile failure strain	0

图 16-48 创建 LAW36 材料

（4）设置 Number of functions 为 1 并单击 OK。

（5）单击按钮 Yield stress function -1。

（6）打开 Function 窗口。

（7）单击按钮 Import curve: 选择模型中已经有的曲线。

（8）在 Function 文件窗口，选择并导入 ID 为 2 的曲线，如图 16-49 所示。

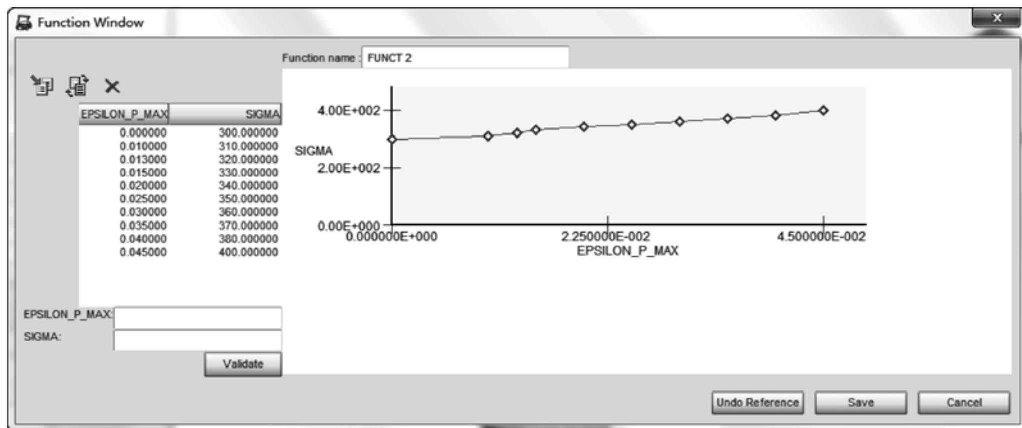


图 16-49 指定 LAW36 的曲线

（9）单击 Save。

（10）单击 Tree 面板并选择 HCFoam 部分。

（11）单击隐藏该部分。

（12）单击 Material 面板。

（13）单击 Include picked parts 并在图形区选择 Inner、Outer 和 Flat 部分，如图 16-50 所示。

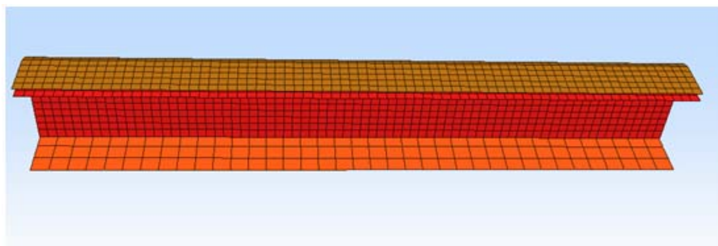


图 16-50　选择部件

（14）单击右下角的 Yes。

（15）单击 Save。

STEP 04 为 PART HCFoam 创建并赋予蜂窝材料

（1）在 Choose Material Law 中，单击 RADIOSS→Other→Honeycomb orthotropic（28）。

（2）在 Title 文本框中输入 Foam。

（3）输入图 16-51 所示的材料参数。

Title	Foam
Initial density	4E-10
Young modulus, E11	225
Young modulus, E22	225
Young modulus, E33	225
Shear modulus, G12	200
Shear modulus, G23	200
Shear modulus, G31	200
Failure plastic strain in dir. 1	0
Failure plastic strain in dir. 2	0
Failure plastic strain in dir. 3	0
Failure plastic strain in dir. 12	0
Failure plastic strain in dir. 23	0
Failure plastic strain in dir. 31	0
Strain formulation for yield functions 11,22,33	
Yield stress is a funct. of vol. strains	
Strain formulation for yield functions 12,23,31	
Yield stress is a funct. of vol.	

图 16-51　定义蜂窝材料

（4）单击 Yield function 11 按钮，出现 Function 窗口。

（5）单击 Import Curve 并选择模型中已经存在的一条曲线。

（6）在 Function 文件窗口中单击按钮 Import curve: 并选择 ID 为 5 的曲线。

（7）单击 Save。

（8）用同样的方法创建其他的 Yield function，如图 16-52 所示。

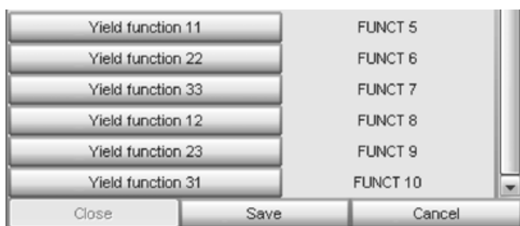


图 16-52　指定屈服曲线

（9）单击 Tree 面板并选择 HCFoam（7）部分。

（10）单击 只显示这一部分。

（11）单击 Material 面板。

（12）单击 Include picked parts 并在图形显示区域内选择 HCFoam 部件（实体芯），如图 16-53 所示。

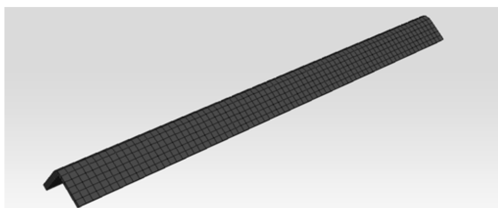


图 16-53　指定蜂窝材料赋予的部件

（13）单击右下角的 Yes。

（14）单击 Save→Close。

STEP 05 为 PARTInner、Outer 和 Flat 创建并赋予属性

（1）在下拉菜单中单击 Model→Property。

（2）在 Choose Property Law 中单击 RADIOSS→Surface→Shell（1），如图 16-54 所示。

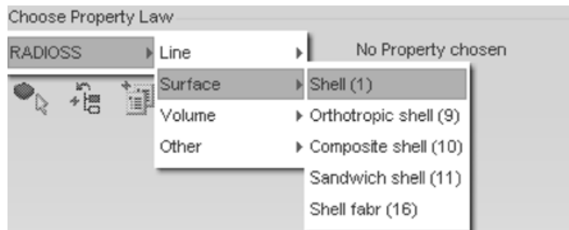


图 16-54　创建 Shell 属性

（3）在 Title 文本框中输入 Shell Property。

（4）输入图 16-55 所示的 Thickness 与 Shell element formulation 的参数值。

Title	Shell Property
Memb. hourglass coef.	0
Out of plane hourglass	0
Rot. hourglass coef.	0
Membrane damping	0
Numerical damping	0
Nb integration points	0
Thickness	0.9119
Shear factor	0
Shell small strain option	Use value in /DEF_SHELL
Shell element formulation	Q4, with improved type 1 formulation T3, with large rotation formulation

图 16-55　定义 Shell 卡片值

（5）单击 Tree 面板选择 Inner、Outer 和 Flat 部分。

（6）单击只显示这一部分。

（7）单击 Property 面板。

（8）单击 Include picked parts 按钮并在图形区域中选择 Inner、Outer 和 Flat 部分赋予 PShell 属性。

（9）单击右下角的 Yes。

（10）单击 Save。

STEP 06 为 PART Impactor 和 Support 创建并赋予属性

（1）在 Choose Property Law 中选择 RADIOSS→Surface→Shell（1）。

（2）在 Title 文本框中输入 Rigid Property。

（3）输入 Thickness 值为 .91186，如图 16-56 所示。

（4）单击 Tree 面板并选择 Impactor 与 Support 部分。

（5）单击只显示这一部分。

（6）单击 Property 面板。

（7）单击 Include picked parts 按钮并在图形显示区域中选择 Impactor 与 Support 赋予 Rigid Property。

（8）单击右下角的 Yes。

（9）单击 Save。

Title	Rigid Property
Memb. hourglass coef.	0
Out of plane hourglass	0
Rot. hourglass coef.	0
Membrane damping	0
Numerical damping	0
Nb integration points	0
Thickness	.91186
Shear factor	0

图 16-56　创建 Shell 属性

STEP 07 为 PART HCFoam 创建并赋予属性

（1）在 Choose Property Law 中单击 RADIOSS→Volume→General solid（14）。

（2）在 Title 文本框中输入 Foam。

（3）单击 Tree 面板并选择 HCFoam 部分。

（4）单击 只显示该部分。

（5）返回 Property 面板。

（6）在 Solid Element Formulation 中选择 HEPH。

（7）单击 Include picked parts 按钮 并在图形显示区域中选择 HCFoam 赋予 Foam Property。

（8）单击右下角的 Yes。

（9）单击 Save→Close。

STEP 08 为 Impactor 创建刚体

（1）在下拉菜单中单击 Mesh Editing→Rigid Body→Create。

（2）在 Rigid body creation 中输入 Impactor 并单击 OK。

（3）单击 Tree 面板并选择 BENDING 组件。

（4）单击 显示左右部分。

（5）单击 Mesh Editing 面板。

（6）使用 Include picked parts 按钮在图形区域中选择 Impactor，如图 16-57 所示。

（7）单击 Yes→Save。

STEP 09 为 Support 创建刚体

（1）在 Title 文本框中输入名称 Support。

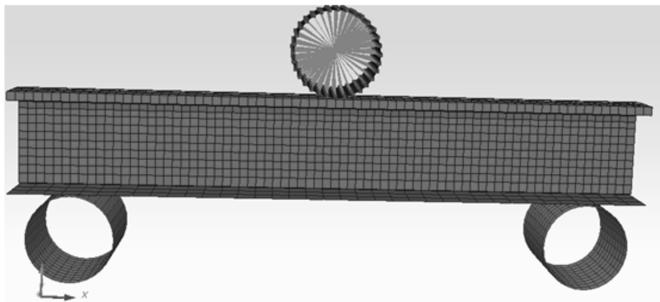


图 16-57　创建 Impactor 刚体

（2）单击 OK。

（3）使用 Include picked parts 按钮在图形显示区域中选择 Support。

（4）单击 Save。

（5）创建的刚形体如图 16-58 所示。



图 16-58　创建 Support 刚体

（6）单击 Close。

STEP 10 创建模型的边界条件

（1）在下拉菜单中选择 LoadCase→Boundary Condition→Create。

（2）按〈F6〉键显示刚体。

（3）在 Boundary Condition creation 中输入 BC 并单击 OK。

（4）使用任意一个 node selection 按钮选择 Impacto 刚体的主节点，如图 16-59 所示。

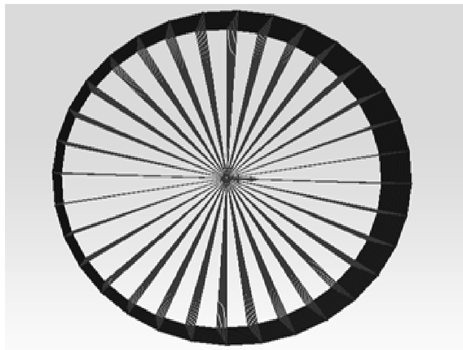


图 16-59　选择 Impactor 刚体的主节点

（5）约束除 TZ 以外的所有自由度，如图 16-60 所示。



图 16-60　约束 Impactor 刚体的自由度

（6）单击 Save。

（7）在 Boundary Condition creation 中输入 Support Fix 并单击 OK。

（8）使用任意一个 node selection 按钮选择 Support 刚体的主节点，如图 16-61 所示。

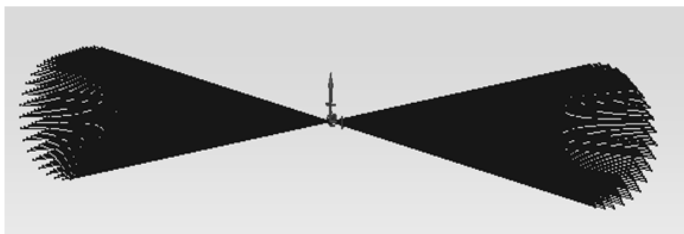


图 16-61　选择 Support 刚体的主节点

（9）如图 16-62 所示，约束该点所有的自由度 Tx、Ty、Tz、Rx、Ry 与 Rz。



图 16-62　约束 Support 刚体的所有自由度

（10）单击 Save。

（11）在 Boundary Condition creation 中输入 Symmetry 并单击 OK。

（12）单击 Tree 面板并选择 Inner、Outer、HCFoam 与 Flat 部分。

（13）单击只显示该部分。

（14）按〈P〉键改变透视图。

（15）单击 Boundary Conditions 面板。

（16）从视图工具栏中选择 *YZ* 视图，如图 16-63 所示，以方便使用选择对称点。

（17）选择图 16-64 所示的节点。

（18）约束这些节点的 Ty、Rx 和 Rz，如图 16-65 所示。

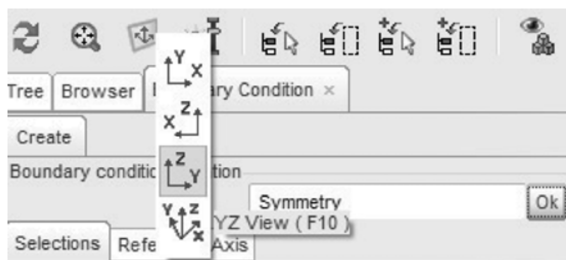


图 16-63　切换 *YZ* 视图

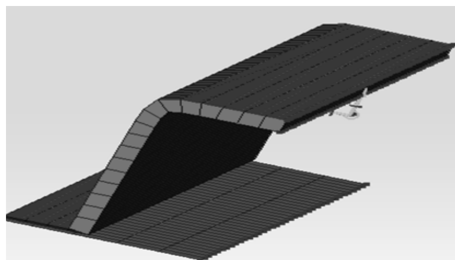


图 16-64　选择对称边界节点

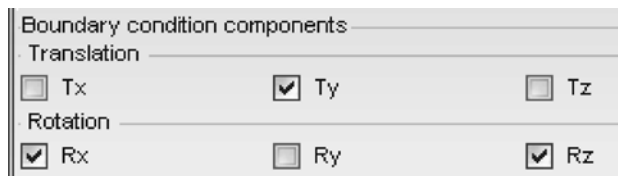


图 16-65　定义对称约束

（19）单击 Save→Close。

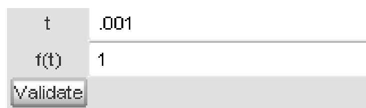
STEP 11　定义 Impactor 的强制速度

（1）在下拉菜单中选择 LoadCase→Imposed Velocity→Create。

（2）在 Title 文本框中输入 IMPOSED VELOCITY 并单击 OK，出现一个 Function 窗口。

（3）输入图 16-66a 所示的值并单击 Validate。

（4）输入图 16-66b 所示的第二组值并单击 Validate。



a)



b)

图 16-66　定义速度曲线

（5）单击 Save。

（6）按〈F6〉键显示刚性体。

（7）单击选择 Impactor 上面的节点，如图 16-67 所示。

（8）单击右下角的 Yes。

（9）单击 Properties 面板并输入图 16-68 所示的数据。

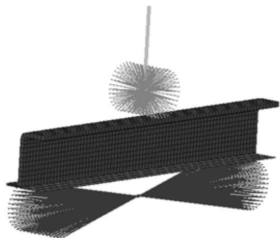


图 16-67　选择速度施加的节点

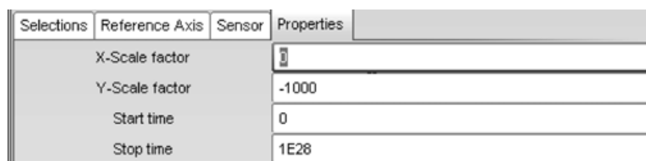


图 16-68　定义速度曲线的缩放

（10）对于 Direction of Translation，选择 Tz。

（11）单击 Save→Close。

STEP 12 定义模型接触

（1）在下拉菜单中选择 LoadCase→Contact Interface→Create/Modify。

（2）对于 Choose Contact 选择 Multi usage（Type 7）。

（3）单击 Properties 面板。

（4）在 Title 文本框中输入 Support。

（5）单击 selection 面板。

（6）单击 Tree 面板并选择 Flat 与 Support 部分。

（7）单击只显示该部分。

（8）单击 Contact 面板。

（9）使用选择 Flat 组件作为 Slave，并选择 Support 组件作为 Master，如图 16-69 所示。

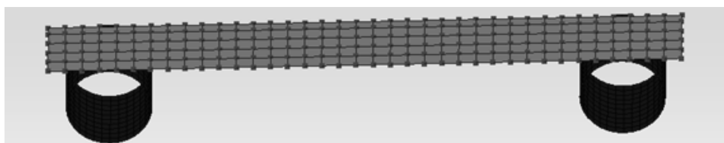


图 16-69 定义第一个接触

（10）单击 Properties 面板并设置 Coulomb friction 为 0.1。

（11）设置 Min gap for impact active 为 0.2。

（12）单击 Save。

（13）在 Choose Contact 中选择 Multi usage（Type 7）。

（14）单击 Tree 面板并选择 Outer 与 Impactor 部分。

（15）单击只显示这些部分。

（16）单击 Contact 面板。

（17）使用选择 Outer Part 作为 Slave，选择 Impactor 作为 Master。

（18）单击 Properties 面板并在 Title 文本框中输入 Imp_Outer。

（19）在 Properties 面板中设置 Coulomb friction 为 0.1。

（20）设置 Min gap for impact active 为 0.2。

（21）单击 Save。

（22）对于 Choose Contact 选择 Multi usage（Type 7）。

（23）单击 Tree 面板并选择 Outer、Inner 与 Flat 部分。

（24）单击只显示所选择的部分。

（25）单击 Contact 面板。

（26）选择 Self-Impact。

（27）使用选择图 16-70 所示的 Outer、Inner 与 Flat 组件。

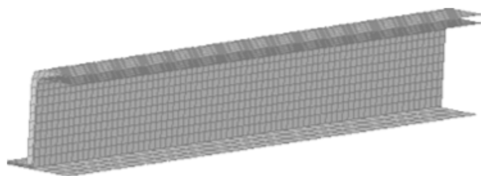


图 16-70　选择自接触的部件

（28）单击 Properties 面板并在 Title 文本框中输入 Self。

（29）设置 Coulomb friction 为 0.1。

（30）设置 Min gap for impact active 为 0.7。

（31）单击 Save。

STEP 13 清理并导出模型

（1）在下拉菜单中，选择 Mesh Editing→Clean，如图 16-71 所示。

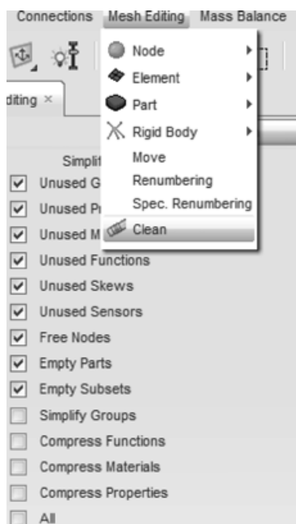


图 16-71　清理模型

（2）选择 All。

（3）单击 Clean→Close。

（4）在菜单栏中选择 File→Export→RADIOSS。

（5）在打开的输出窗口中，输入名称 3PBENDING 并单击 OK。

（6）保持 Header of RADIOSS file 窗口空白并单击 Save Model。

（7）此时，Starter 文件 3PBENDING_0000.rad 被保存到磁盘上，同时导出 Engine 文件的窗口打开。

（8）单击 Write Engine File。

（9）此时，Engine 文件 3PBENDING_0001.rad 被保存到磁盘上。

（10）在文本编辑器中，打开 3PBENDING_0001.rad，删除原来的内容，并复制以下内容，然后单击保存。

```
#
/TITLE
/VERS/90
/DT/INTER/DEL
9.000000e-001 3.500e-008
/DT/NODA/SET
9.000000e-001 7.000e-007
/ANIM/DT
0.000000e+000 2.500e-003
/TFILE
1.000000e-004
/PRINT/-100
/RUN/3PBENDING/1
7.01E-2
/ANIM/ELEM/EPSP
/ANIM/ELEM/VONM
/ANIM/VECT/VEL
/ANIM/VECT/CONT
/MON/ON
```

STEP 14 提交求解并查看结果

（1）使用 RADIOSS Manager 求解模型，在 Input file 文本框中输入运行模型 3PBENDING_0000.rad，同时 Options 选择–both，单击 Run，如图 16–72 所示。

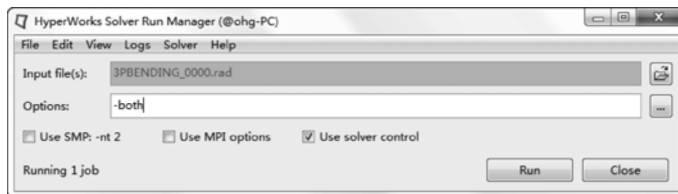


图 16–72　提交请求

（2）求解完成后，使用 HyperView 显示应变云图，如图 16–73 所示。

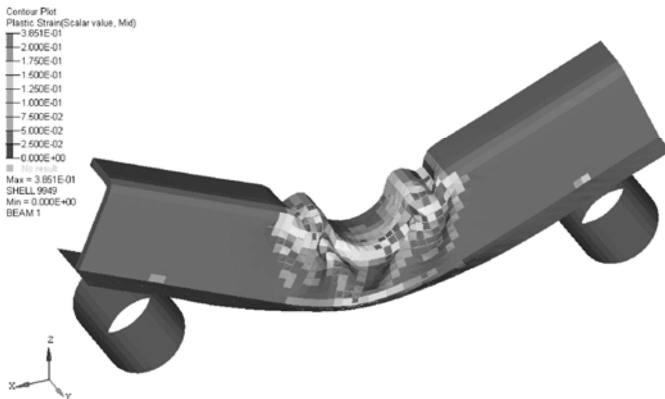


图 16–73　塑性应变云图

（3）使用 HyperGrap 打开 3PBENDINGT01 文件，查看压头接触力时间历程曲线，如图 16-74 所示。

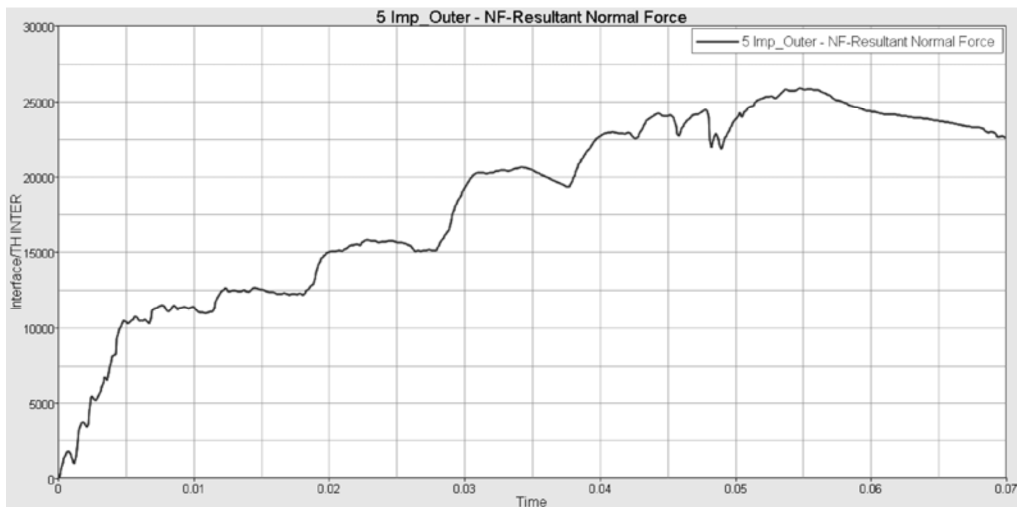


图 16-74　压头接触力时间历程曲线

2．基于 HyperMesh 的建模过程

STEP 01 载入 RADIOSS 用户配置

（1）启动 HyperMesh。

（2）从 Preferences 菜单中选择 User Profiles 或在工具栏上单击按钮 。

（3）选择 RADIOSS (Block100)并单击 OK。

STEP 02 载入 RADIOSS 文件

（1）在下拉菜单中单击 File。

（2）单击 Import→Model。

（3）单击 Select File 按钮，浏览至正确的文件夹，选择 BENDING_0000.rad。

（4）单击 Import。

（5）单击 Close 关闭这个窗口。

STEP 03 创建并为零件 HCFoam 指定材料和属性

（1）在 Model Browser 中选择 HCFoam，然后右键单击选择 edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Material 标签创建材料。

（4）确认选中 Assign material。

（5）在 mat name 文本框中输入 Foam。

（6）设置 type 为 OTHER，card image 选择 M28_HONEYCOMB。

（7）单击 Create Material。

（8）输入以下值，如图 16-75 所示。Rho_I：3.000e-10；E11：200.000；E22：200.000；E33：200.000；G12：150.000；G23：150.000；G31：150.000；指定 YFUNC11、YFUNC22、YFUNC33、YFUNC12、YFUNC23 和 YFUNC31 分别为 5、6、7、8、9 和 10。

/MAT/HONEYCOMB/ Id 3
Foam
[Rho_Initial] 4.000e-10 [Ref_Rho] 0.000
[E11] 225.000 [E22] 225.000 [E33] 225.000
[G12] 200.000 [G23] 200.000 [G31] 200.000
YFUNC11 5 YFUNC22 6 YFUNC33 7 [Iflag1] 0 [F_scale11] 0.000 [F_scale22] 0.000
[EPSMAX_11] 0.000 [EPSMAX_22] 0.000 [EPSMAX_33] 0.000
YFUNC12 8 YFUNC23 9 YFUNC31 10 [Iflag2] 0 [F_scale12] 0.000 [F_scale23] 0.000
[EPSMAX_12] 0.000 [EPSMAX_23] 0.000 [EPSMAX_13] 0.000
User Comments
Hide In Menu/Export
RADIOSS_COMMENT_FLAG
RefRho_Option
ALE CFD Formulation
NONE
HEAT_Input
reject
default
abort
return

图 16-75　定义 Foam 材料

（9）单击 return 返回至零件对话框。

（10）单击 Property 标签创建属性。

（11）确认选中 Assign property。

（12）在 prop name 文本框输入 Foam。

（13）设置 type 为 VOLUME。

（14）选择 card image 并将其设置为 P14_SOLID。

（15）单击 Create Property。

（16）输入以下值，如图 16-76 所示。qa：0.000；qb：0.000；h：0.000；deltaT_min：0.000。

/PROP/SOLID/ Id 4
Foam
[ISOLID] 24 [Ismstr] 0 [Icpre] 0
[qa] [qb] [h]

图 16-76　定义 Solid 属性卡

（17）单击 return。

（18）单击 update 更新零件。

STEP 04 创建并指定材料和属性给零件 Inner

（1）在 Model Browser 中选择 Inner，然后右键单击选择 edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Material 标签创建材料。

（4）确认选中 Assign material。

（5）在 mat name 文本框中输入 Inner。

（6）对于 type 选择 ELASTO-PLASTIC，对于 card image 选择 M36_PLAS_TAB。

（7）单击 Create Material。

（8）输入以下值，如图 16-77 所示。

Rho_I：7.850e-09；E：210000.000；nu：0.290；EPS_max：0.000；EPS_t1：0.000；C_hard：0.000；Fcut：0.000；Epsilon_F：0.000；alpha1：1.000；指定 I_func 为 2。

/MAT/PLAS_TAB/ Id 4
Inner
[Rho_Initial] 7.850e-09 [Ref_Rho] 0.000
[E] 210000.000 [nu] 0.290 [EPS_max] 0.000 [EPS_t1] 0.000
[N_func] 1 [Fsmooth] 0 [C_hard] 0.000 [Fcut] 0.000 [Epsilon_F] 0.000
Ipfun 0 [F_scale] 0.000
I_func1 13
[alpha1]
User Comments
Hide In Menu/Export
RADIOSS_COMMENT_FLAG
RefRho_Option
ALE CFD Formulation
NONE
HEAT_Input
reject default abort return

图 16-77 定义 Inner 材料

（9）单击 return 返回至零件对话框。

（10）单击 Property 标签创建属性。

（11）确认选中 Assign property。

（12）在 prop name 文本框中输入 Inner。

（13）设置 type 为 SURFACE，对于 card image 选择 P1_SHELL。

（14）对于 thickness 输入 9.119e-01。

（15）单击 Create Property。

（16）输入以下值，如图 16-78 所示。Hm：0.00；Hf：0.00；Hr：0.00；Dm：0.00；Thick：9.119e-01；Ashear：0.000。

[Ishell] 4 [Ismstr] 0 [Ish3] 0
[Hm] 0.000 [Hf] 0.000 [Hr] 0.000 [Dm] 0.000
[N] 0 [Istrain] 0 [Thick] 9.119e-01 [Ashear] 0.000 [Ithick] 0

图 16-78 定义 Inner 的 Shell 属性

（17）单击 return 退出当前面板。
（18）单击 update 更新零件。

STEP 05 创建并指定材料和属性给零件 Outer

（1）在 Model Browser 中选择 Outer，然后右键单击选择 edit。
（2）确认 card image 设置为 Part。
（3）单击 Material 标签创建材料。
（4）确认选中 Assign material。
（5）在 name 文本框中输入 Outer。
（6）确认选中 Same as。
（7）选择 Inner。
（8）单击 Create material 创建材料 Outer。
（9）单击 return。
（10）单击 Property 标签创建属性。
（11）确认选中 Assign property。
（12）在 prop name 文本框中输入 Outer。
（13）确认选中 Same as。
（14）选择 Inner。
（15）单击 Create property 创建材料 Outer。
（16）单击 return 返回。
（17）单击 update 更新零件。

STEP 06 创建并指定材料和属性给零件 Flat

同 STEP 05。

STEP 07 创建并指定材料和属性给零件 Impactor

（1）在 Model Browser 中选择 Impactor，然后右键单击选择 edit。
（2）确认 card image 设置为 Part。
（3）单击 Material 标签创建材料。
（4）确认选中 Assign material。
（5）在 name 文本框中输入 Impactor。
（6）对于 type 选择 ELASTIC。
（7）对于 card image 选择 M1_ELAST。
（8）单击 Create Material。
（9）输入以下值，如图 16-79 所示。Rho_I：8.000e–09；Ref_Rho：0.000；E：208000.000；

nu：0.290。

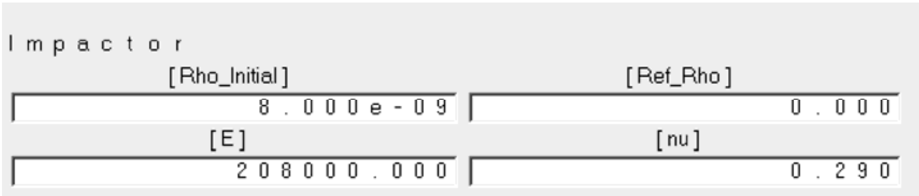


图 16-79　定义 Impactor 材料

（10）单击 return 返回 component 对话框。
（11）单击 Property 标签创建属性。
（12）确认选中 Assign property。
（13）在 prop name 文本框中输入 Impactor。
（14）确认选中 Same as。
（15）选择 Inner。
（16）单击 Create Property 创建属性 Impactor。
（17）单击 return 返回至 component 对话框。
（18）单击 update 更新零件。

STEP 08　创建并指定材料和属性给零件 Support

同STEP 05。复制 Impactor 的材料和属性，命名为 Support 并指定给零件 Support。

完成STEP 08以后，打开 Component 视图或 Component Table 检查材料和属性的分配，分别如图 16-80 和图 16-81 所示。

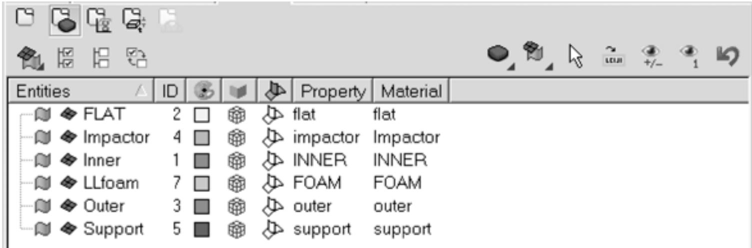


图 16-80　检查 Component 视图

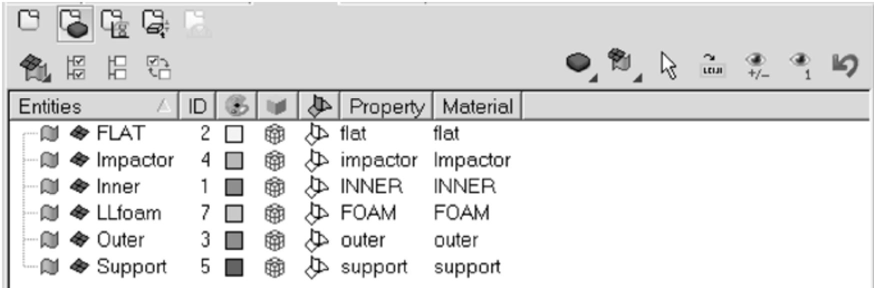


图 16-81　检查 Component 视图

STEP 09 把 Impactor 和 Support 创建成刚体

（1）在 Model Browser 中右键单击选择 Create→Component。
（2）在 name 文本框中输入 Impact rigid。
（3）选择一种颜色。
（4）设置 card image 为 none。
（5）单击 create。
（6）进入 1D 页面，选择 rigid 面板。
（7）确认选中 create 子面板。
（8）设置 dependent 为 comps。
（9）设置 primary node 为 calculate node。
（10）单击 comps。
（11）选择 Impactor，然后单击 select。
（12）单击 create。
（13）单击 return 返回。

（14）重复步骤（1）～（13）为零件 Support 创建一个刚体，名为 Support rigid。创建的两个刚体如图 16-82 所示。

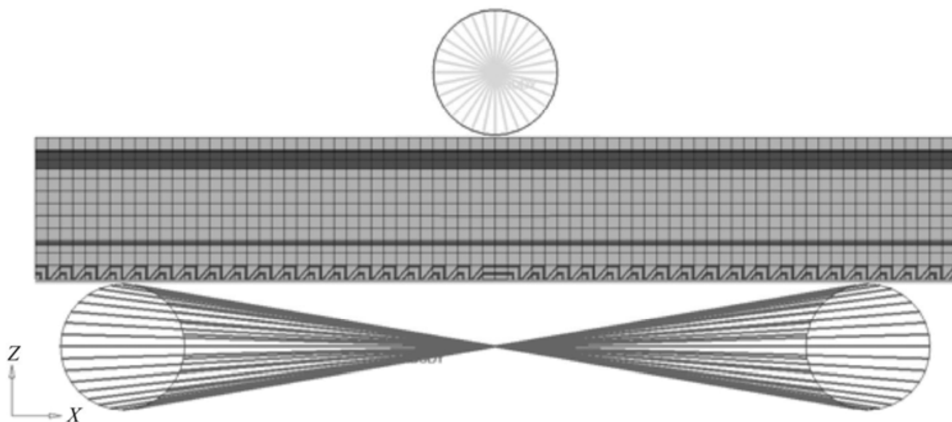


图 16-82　创建的两个刚体

STEP 10 为 Impactor 定义强制速度和边界条件

（1）从 Utility 页面启动 BC's Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 IMPOSED_VELOCITY，设置 Select type 为 Imposed Velocity 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）为刚体选择主节点，选择 Impact rigid 的主节点，如图 16-83 所示。

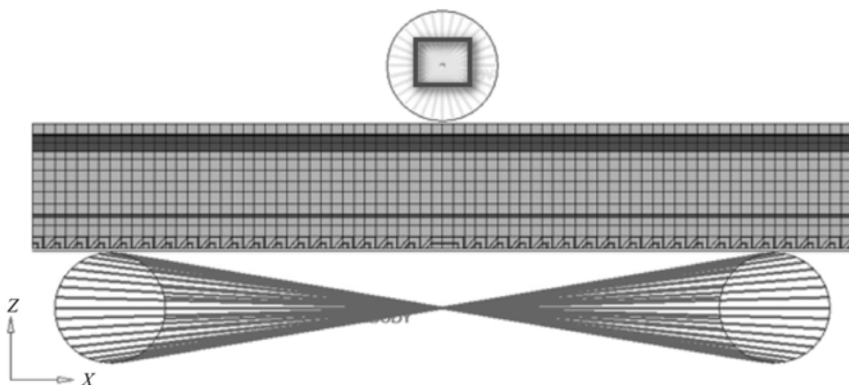


图 16−83　选择速度施加的节点

（4）设置 Direction 为 Z。

（5）因为速度方向与全局 *Z* 轴方向相反，因此设置 Scale Y 为-1000.000。

（6）设置 Curve ID 为 Select curve。

（7）设置 predefined curve 为 Func1。

（8）单击 create 创建强制速度，如图 16−84 所示。

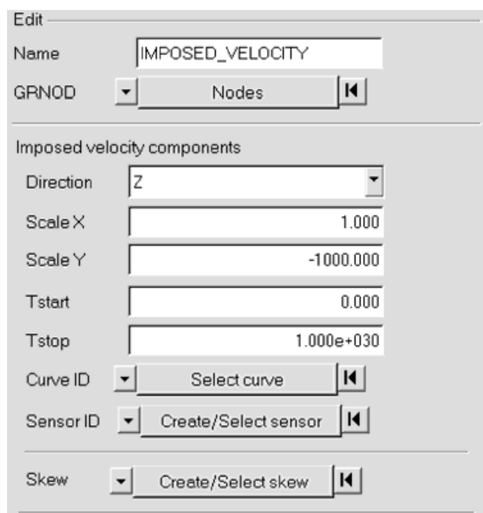


图 16−84　强制速度定义

（9）在 Name 文本框中输入 Impactor_constraints，设置 Select type 为 Boundary Condition 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（10）单击 nodes 并选择刚体的主节点。

（11）选中除 Tz 以外的自由度。

（12）单击 create 创建边界条件。

STEP 11 为 Support 创建固定约束

（1）从 Utility 页面启动 BC’s Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 support_fixed，设置 Select type 为 Boundary Condition 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）选择前面创建的刚体 Support rigid 的主节点，如图 16-85 所示。

（4）约束所有的自由度，如图 16-85 所示。

（5）单击 create 创建这个边界条件。

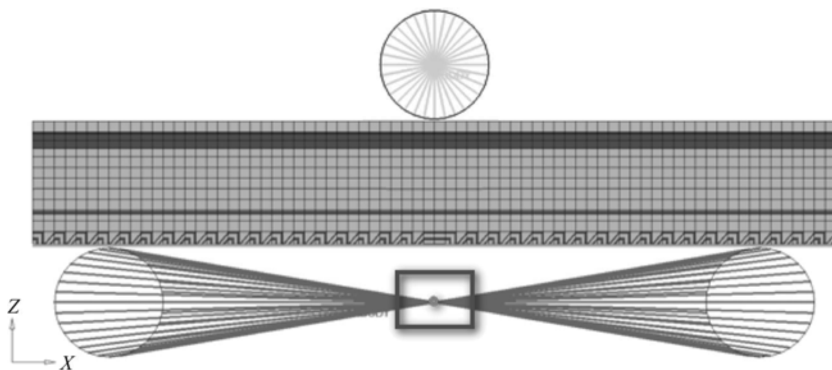


图 16-85　选择 Support rigid 的主节点

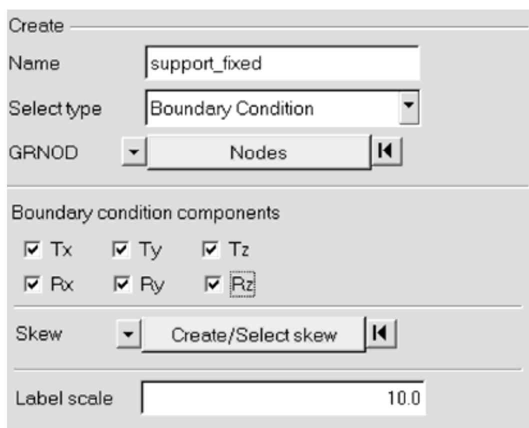


图 16-86　约束所有的自由度

STEP 12 为 Foam、Inner、Outer 和 Flat 创建对称边界条件

（1）从 Utility 页面启动 BC's Manager。

（2）在 Name 文本框中输入 SYMMETRY_XZ，设置 Select type 为 Boundary Condition 并设置 GRNOD 为 Nodes。

（3）选择 Foam、Inner、Outer 和 Flat 的平行于 ZX 平面的上下两部分节点，如图 16-87 所示。

（4）确认约束 *Y* 方向的移动自由度以及 *X* 和 *Z* 方向的转动自由度，如图 16-88 所示。

（5）单击 create 创建这个边界条件。

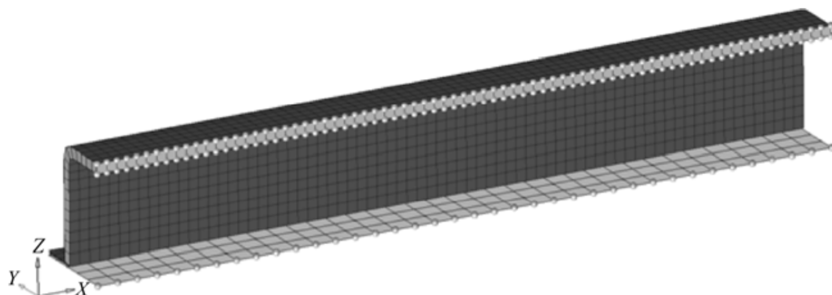


图 16-87　选择对称位置节点

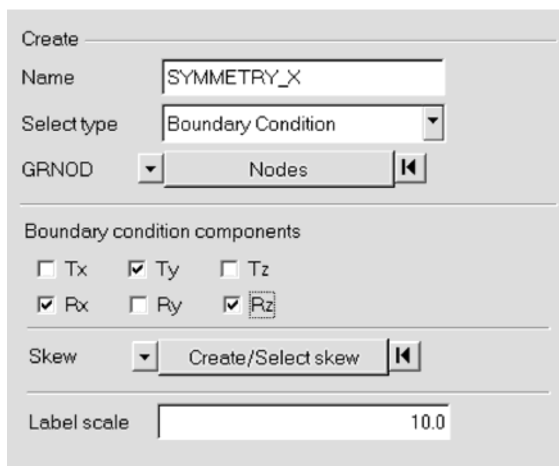


图 16-88　定义对称边界条件

（6）单击 close 退出 BC’s Manager。

STEP 13 定义 Impactor 和 Support 之间的接触

（1）进入 interfaces 面板或通过单击 Tools→Create cards→INTER→TYPE7 定义。
（2）在 name =文本框中输入 Support。
（3）设置 type =为 TYPE7。
（4）单击 create。
（5）进入 add 子面板。
（6）设置 master selector 为 comps。
（7）单击 comps 按钮。
（8）从 list of comps 选择 Support。
（9）单击 select→update。
（10）设置 slave selector 为 comps。
（11）单击 comps 按钮。
（12）选择零件 FLAT。

（13）单击 select→update。

（14）进入 card image 子面板。

（15）单击 edit。

按图 16-89 定义该 Interface 卡片。

Support

grnod_id	surf_id	[Istf]	[Igap]	[Multimp]	[Ibag]	[Idel]
84	85	0	1		0	0

[Gap_Scale]	[Gap_max]
0.000	0.000

[STMIN]	[STMAX]
0.000	0.000

[STFAC]	[FRIC]	[GAPmin]	[Tstart]
0.100	0.200	0.000	0.000

I B C	[INACTI]	[VIS_S]	[VIS_F]
0 0 0	0	0.000	0.000

[Ifric]	[Ifiltr]	[Xfreq]	[Iform]
0	0	0.000	1

图 16-89　定义 Interface Type7 卡片

（16）单击 return 两次退出面板。

STEP 14 定义 Impactor 和 Outer 之间的接触

（1）从 Analysis 页面进入 interfaces 面板，再进入 create 子面板。

（2）在 name =文本框中输入 Imp_Outer。

（3）设置 type =为 TYPE7。

（4）单击 create。

（5）进入 add 子面板。

（6）对于 master 选择 comps。

（7）单击 comps 按钮。

（8）从 list of comps 选择 Impactor。

（9）单击 select→update。

（10）对于 slave 选择 sets。

（11）单击 sets 按钮。

（12）从 list of comps 选择 Outer。

（13）单击 select→update。

（14）进入 card image 子面板并单击 edit，定义卡片，如图 16-90 所示。

（15）单击 return 两次退出面板。

/INTER/TYPE7/　　5

Imp_Outer

grnod_id	surf_id	[Istf]	[I_the]	[Igap]	[Multimp]	[Ibag]	[Idel]
22	23	0	0	0	0	0	0

[Gap_Scale]	[Gap_max]
0.000	0.000

[STMIN]	[STMAX]
0.000	0.000

[STFAC]	[FRIC]	[GAPmin]	[Tstart]
0.000	0.100	0.200	0.000

I B C	[INACTI]	[VIS_S]	[VIS_F]
0 0 0	0	0.000	0.000

[Ifric]	[Ifiltr]	[Xfreq]	[Iform]
0	0	0.000	1

图 16-90　定义 Interface 卡片

STEP 15 定义梁之间的接触

（1）从 Analysis 页面进入 interfaces 面板，再进入 create 子面板。

（2）在 name =文本框中输入 Self。

（3）设置 type =为 TYPE7。

（4）单击 create。

（5）进入 add 子面板。

（6）设置 master selector 为 comps。

（7）单击 comps 按钮。

（8）从 list of comps 选择 Inner、Outer 和 Flat。

（9）单击 select→update。

（10）设置 slave selector 为 comps。

（11）单击 comps 按钮。

（12）从 list of comps 选择 Inner、Outer 和 Flat。

（13）单击 select→update。

（14）进入 card image 子面板。

（15）单击 edit，输入如图 16-91 所示的值。

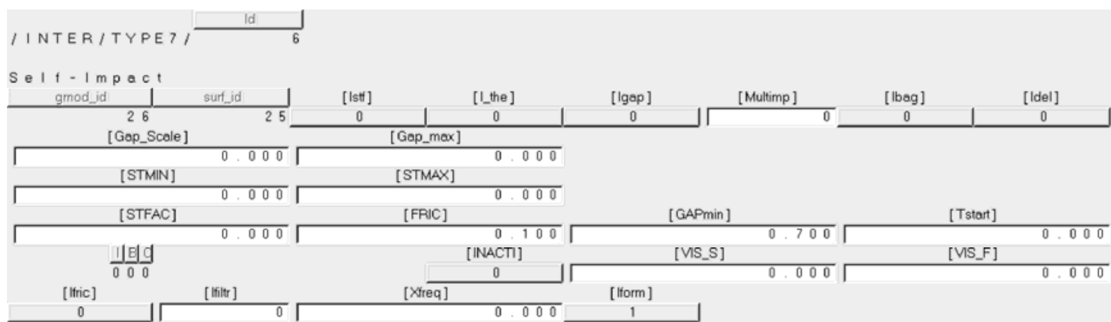


图 16-91　编辑 Interface 卡片

（16）单击 return 两次退出面板。

STEP 16 创建时间历史数据

（1）进入 Analysis 页面，再进入 output block 面板。

（2）在 name=文本框中输入 IMPACTOR。

（3）设置 entity selector 为 groups。

（4）单击 groups 并从下拉列表中选择接触面 Imp_Outer。

（5）单击 select →create→edit。

（6）在 VAR 文本框输入 DEF。

（7）单击 return 两次退出面板。

STEP 17 分配需要的内存

（1）从 main 菜单进入 Analysis 页面，再进入 Control Cards 子面板。

（2）单击 MemoryReq。

（3）单击 NMOTS 并输入 20000，如图 16−92 所示。

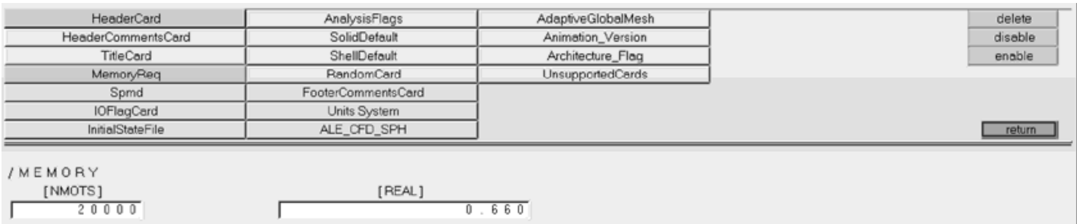


图 16−92　定义控制卡片

STEP 18 在控制卡片中创建输出要求

在 Utility 菜单中进入 RADIOSS Tools 页面，单击 Engine File，输入如图 16−93 所示的值。

注意：对于 RBODY/ON，选择两个刚体的主节点，上面的值是 Impactor 和 Support 两个刚体的主节点编号，对于不同的模型也许会有所不同。

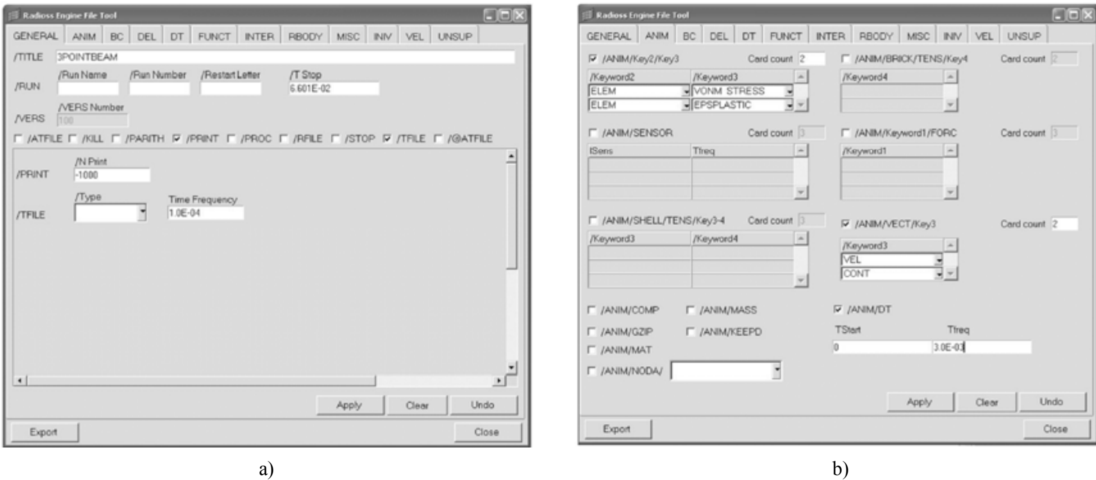
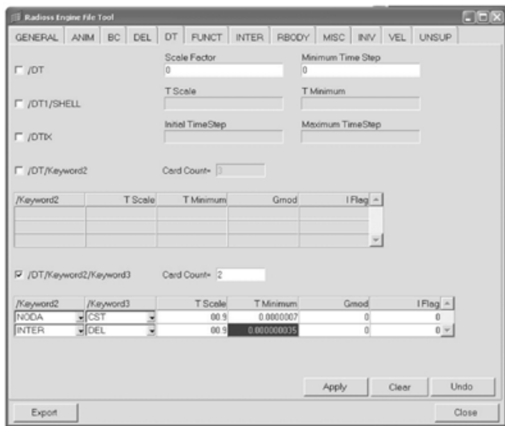
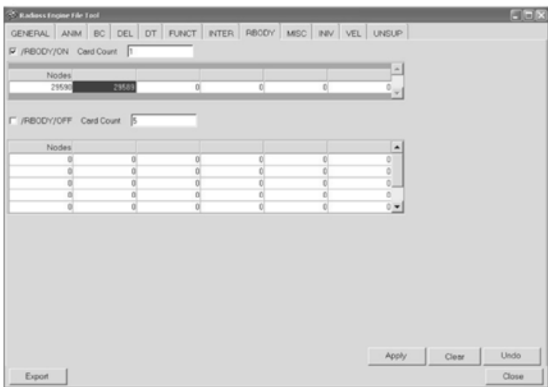


图 16−93　设置 Engine 面板



c)



d)

图 16-93　设置 Engine 面板（续）

STEP 19 导出模型

（1）在 File 下拉菜单中单击 Export 或者单击 Export 按钮（对于 standalone）或按钮（对于 HyperWorks Desktop）。

（2）对于 File，单击文件夹按钮（对于 standalone）或按钮（对于 HyperWorks Desktop）并浏览至欲放置的文件夹。

（3）在 name 文本框中输入 bending 并单击 Save。

（4）单击 Export options 旁边的下拉按钮展开面板。

（5）单击 Merge starter and engine file 以导出一个整体文件。

（6）单击 Export 导出求解文件。

至此，建模完成，请参考本实例第一部分中的 STEP 14，进行求解并查看结果。

16.7　本章小结

本章在对 RADIOSS Block 里的材料模型和失效模型进行简要介绍后，对工程结构常用材料模型和失效模型进行了介绍，包括一般弹塑性材料模型 LAW2、LAW27、LAW36 和 LAW65，蜂窝材料模型 LAW68，粘弹性材料模型 LAW70 以及超弹性材料模型 LAW82。RADIOSS Block 材料建模的另一个要素——失效模型在本章也进行了较为详尽的介绍，包括成形极限图（FLD）模型、拉应变失效模型、Johnson-Cook 失效模型、Tuler-Butcher 累积损伤破坏模型、Bao-Xue-Wierzbicki 失效模型、用于复合材料的 Chang-Chang 失效模型。同时，基于一般建模实践经验，本章还对常用材料金属及其合金、玻璃、泡沫橡胶和弹性体、复合材料等的建模给出了一般性建议。对于常用的金属板材拉伸试验数据的处理转化以及 Johnson-Cook 失效模型参数的确定，本章给出了详细实例。

本章的实例教程分别涉及 LAW2 及金属拉伸试验数据、橡胶材料、泡沫材料以及复合材料的建模及应用，希望读者通过实例对各种常用材料模型的使用加深掌握。

第 17 章

运动约束



在 RADIOSS Block 里，运动条件是对一组节点施加的节点约束关系，包含以下内容：

- 刚体（Rigid Body）。
- 刚性墙（Rigid Wall）。
- 边界条件（位移、速度、加速度条件）。
- 绑定接触（不基于罚函数的绑定接触，Interface Type 2）。
- 刚性杆（Rigid Link）。
- 圆柱副（Cylindrical Joint）。
- 运动铰接（Kinematic Joints）。

这些运动约束按照数值处理方法，可以归为如下几类：

- 罚函数方法（Rigid Wall）。
- 主–从运动条件（Interface Type 2，Rigid Body）。
- 局部运动约束（Rigid Link，Cylindrical Joint）。

绑定接触（Interface Type 2）作为接触的一种类型，将在第 18 章里介绍。本章主要介绍另外两类常用的运动条件：Rigid Body 和 Rigid Wall。

本章重点知识

17.1 刚体（/RBODY）
17.2 刚性墙（/RWALL）
17.3 实例教程—带包装材料电视机跌落试验模拟
17.4 本章小结

17.1 刚体（/RBODY）

Rigid Body 是由一个从节点组（slave node set），或称为从节点集（slave node group）和一个主节点（master node）组成的。按照刚体的定义，所有的从节点之间是没有相对运动的，整个刚体的运动由主节点控制。因此，它是一种对所有从节点的所有自由度的一种运动条件，即从节点的自由度是非独立自由度，由主节点控制。于是，这些从节点上就不能再施加其他类型的节点约束了，这就是所谓的运动条件相容性。如果刚体的从节点再施加其他的运动约束，比如节点强制位移，那么这些 Rigid Body 的从节点的自由度（非独立自由度）将出现不相容的运动条件，即从节点自由度已被主节点所控制。如果再被位移条件控制，则这些自由度将产生过约束的情况，即它们是不相容的。但是对于拉氏乘子法，不相容的运动条件是可以求解的。

由于 Rigid Body 的运动受控于主节点，因此其主节点和质心（COG）的关系，以及正确的总质量是 Rigid Body 的要素。在 RADIOSS Block 里我们通过 Rigid Body 的卡片 /RBODY 的参数 ICoG 来描述这两个问题。

（1）ICoG=0 和 1：为默认值， COG 通过主节点和各从节点合成得到；主节点在计算开始前被自动移到计算所得的 COG 上；对 Rigid Body 施加的质量和惯量被放在主节点上。

（2）ICoG=2：COG 仅通过各个从节点的坐标合成得到；主节点在计算开始前被自动移到计算所得的 COG 上；对 Rigid Body 施加的质量和惯量放在 COG 上。

（3）ICoG=3：将主节点坐标设为 COG；主节点位置不会被移动；对 Rigid Body 施加的质量和惯量放在主节点上；所有从节点的质量和惯量转移到主节点上。

（4）ICoG=4：将主节点坐标设为 COG；主节点位置不会被移动；对 Rigid Body 施加的质量和惯量放在 COG 上；忽略所有从节点质量和惯量。

在创建 Rigid Body 时，强烈建议使用一个人造的节点（而不是某单元的节点）作为主节点，因为 RADIOSS Starter 可能会移动这个主节点的位置，如果 ICog 参数不是 3 或者 4 的话，主节点的位置将在模型初始化时被 RADIOSS 求解器移动。对于大多数情况，建议使用 ICog=2 的选项，以获得最真实的行为：COG 的位置仅考虑所有从节点的合成。如果 ICoG=2，主节点自身也要参与 COG 的合成。但是，如果主节点本来就是在 COG 上，那么 ICoG=1 和 ICoC=2 的行为就是相似的。图 17−1 说明了各种选项对于 COG 计算的差异。

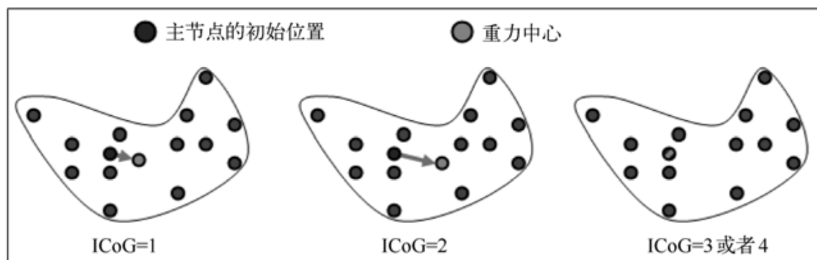


图 17−1　质心 COG 的计算

对汽车碰撞仿真，Rigid Body 被大量使用，但是可以分成 3 种典型情况。

（1）**Rigid Body 将有限元模型部件，包括 Shell、Solid 或其他类型单元变成刚性体。**这种情况下，从节点的质量之和就是整个 Rigid Body 的总质量，没有额外需要增加的质量。主节点的位置可以在任何地方，求解器预处理时会自动将它移动到质心位置。这种 Rigid Body 会大大节省模型计算的 CPU 时间。

（2）**使用 Rigid Body 表达一个没有网格建模的部件连接到其安装位置或相关位置。**这时仅有少数从节点将这个 Rigid Body 连接到有限单元模型上。对这个 Rigid Body 增加重量和惯量（设置卡片/RBODY 的参数 Mass 参数和 J 参数）来表达简化的无网格部件，主节点位于该部件的质心位置。少量的从节点只会是主节点移到位置移动很小。某些情况下，需要使用外形网格来可视化一个刚体或者得到其接触情况，如果外形网格的质量很小，那么从节点导致的主节点向 COG 移动的位移也很小。但是对于外形质量很大，可能导致主节点自动移动的位移较大时，建议使用 ICoG=4 选项。比如，对于带有详细外形网格的发动机 Rigid Body，即使赋予一个很小的厚度仍然有可能使得所有从节点总质量不能忽略，而且通过外形网格从节点计算得到的质心和重量并不是正确的整个发动机刚性体的质心和重量，这时建议的建模方法是：在该 Rigid Body 的/RBODY 卡片中，将其主节点（rb_ID）设置为已知的全局坐标系下发动机质心位置，然后输入在 skew_ID 对应坐标系下正确的总质量和惯量（Mass 参数和 J 参数），并将 ICoG 设为 4。（请读者结合上述介绍，理解这一建模思想。）

（3）**使用 Rigid Body 连接两个或者更多的 PART。**这种情况即所谓的刚性连接。这些刚体不需要额外施加质量和惯量，主节点可以是任意位置，但是需要设置球形惯量（Ispher=1）。因为这些刚性连接 Rigid Body 通常仅有很少（4～8）的从节点，其惯量经常在某个方向很小，同时在另外一些方向又很大，这将会导致数值不稳定，尤其是仅有两个从节点的情况，通过设置球形惯量选项，惯量得以在各个方向相同。

17.2　刚性墙（/RWALL）

Rigid Wall 是对一组从节点施加约束，以避免它们穿过墙。如果检测到刚性墙的从节点与刚性墙发生了接触，从节点的加速度和速度将被修改。完整的刚性墙的定义不仅需要定义墙本身，还需要定义它的作用对象——从节点，即限制穿过墙的约束仅对定义的从节点有效。

在判断从节点是否与刚性墙发生接触时，既不考虑 Gap，也不考虑从节点所在单元的厚度，只要从节点本身沿刚性墙法向的负方向达到刚性墙的表面，则接触发生。从节点的切向速度是否要被修改取决于/RWALL 卡片的参数 Slide。其默认值（=0）允许模拟在接触后纯滑动，如果设为 1，发生接触后，从节点将不允许滑动，在切向方向被附着在刚性墙上。如果设为 2，允许基于库伦模型的摩擦滑动。

刚性墙既可以是固定的，也可以是移动的。固定刚性墙对于所有接触的节点是纯运动条件，而移动刚性墙则类似于一个主从关系。主节点确定了每个时间步下刚性墙的位置并对接触上的从节点施加速度。碰撞从节点的力被施加到主节点上，而从节点的碰撞力则由动量守恒计算得到。

RADIOSS Block 共有 4 种刚性墙。

（1）无限大刚性平面墙（Infinite Rigid Wall）：无限大刚性平面墙是一个无限延伸的平面，使用两个节点定义其位置和法向，如图 17−2 所示。

（2）无限大刚性柱面墙（Infinite Cylindrical Wall）：无限大刚性柱面墙是在长度方向无限延伸的圆柱面，使用两点（确定其轴向）和一个直径定义，如图 17−3 所示。需要注意的是，只有当其从节点从外部进入圆柱内部时，该刚性墙才起作用。

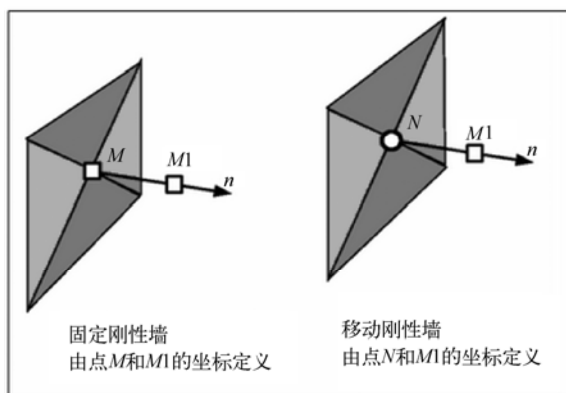


图 17−2　无限大刚性平面墙

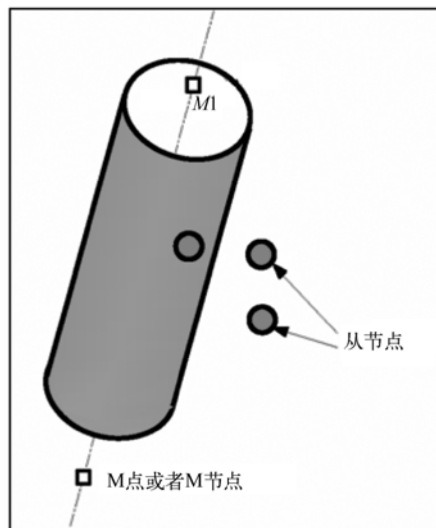


图 17−3　无限大刚性柱面墙

（3）球形刚性墙（Spherical Wall）：球形刚性墙是一个有限大的球表面，使用一点（确定球心）和直径定义，如图 17−4 所示。

（4）有限平面刚性墙（Finite Planar Wall）：有限平面刚性墙是一个矩形面，使用 3 个点定义（*M*, *M*1 和 *M*2），如图 17−5 所示。如果它被定义成移动刚性墙，则节点 *M* 被认为是主节点。

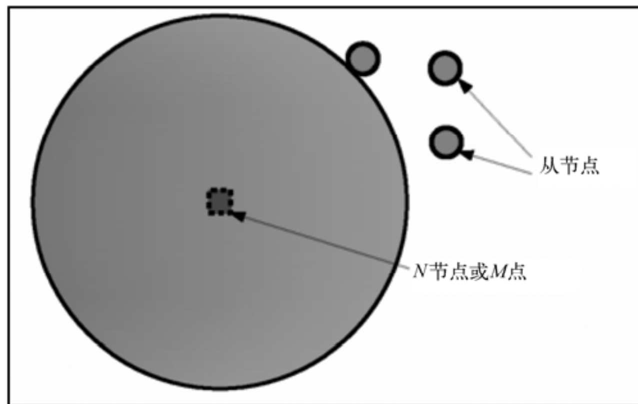


图 17−4　球形刚性墙

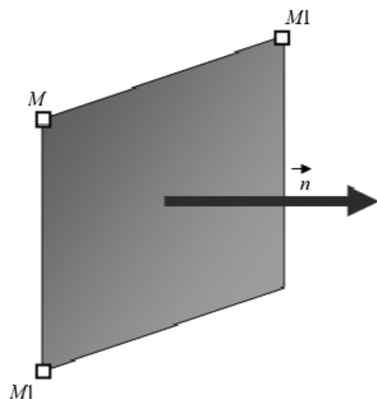


图 17−5　有限平面刚性墙

关于刚性墙的定义和使用，需要说明如下 5 点：

（1）在移动刚性墙的仿真中，其位置跟随主节点 *N*，但是其法向保持恒定，平行于初始法向。移动刚性墙不遵守力矩平衡，仅保证力平衡，即有一个额外的力矩施加到刚

性墙上。

（2）如果刚性墙的从节点是通过与墙的距离来定义的，那么刚性墙法向方向距离范围内的节点将被视作初始从节点，法向负向的节点（无论距离多大）和圆柱面墙内部的节点都不会被视作从节点。另外，通过距离确定从节点时，这个距离仅对初始化确定从节点有效，即从节点通过距离被确定后，不会因为刚性墙定义了距离而在后续结构变形过程中有新的节点成为其从节点。

（3）从节点初始碰撞到刚性墙时不能反弹，除非其反弹速度足够高，能使其在一个积分步长内离开刚性墙。

（4）如果节点坐标施加了随机噪声（/RANDOM），刚性墙的从节点也将被修改，对于移动刚性墙，墙的位置也会变化。于是，恰好在刚性墙表面上或距离非常近的从节点就有可能因此进入到刚性墙的法向负面或圆柱里面，如果这个刚性墙是通过距离来初始化其从节点的，那么这些节点就不在从节点范围内。

（5）对于节点随机噪声，移动刚性墙的法向也会受到影响。主节点 N 将随随机噪声移动，同时使用节点 N 和 $M1$ 定义的法向也会变化。当 $M1$ 和 N 距离很近时，可能会导致刚性墙法向有较大变化，图 17−6 说明了这种情况。

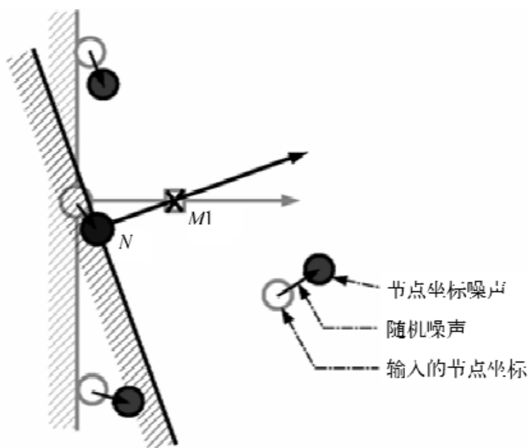


图 17−6　随机噪声导致的法向变化

17.3　实例教程—带包装材料电视机跌落试验模拟

本教程模拟一个带泡沫及纸盒包装的电视机跌落试验，如图 17−7 所示。为节省模拟时间，模型设置为从电视机接触地面开始计算。

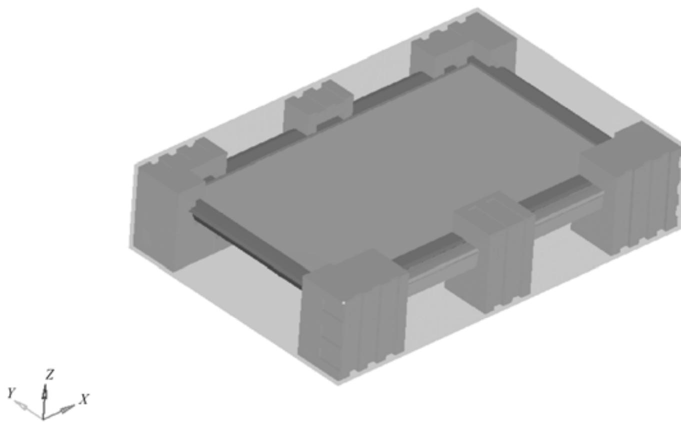


图 17−7　带包装材料电视机跌落

模型采用的基本单位是 mm、s、T，求解时间长度 0.1s，初始速度为 *Y* 轴负向 2 619mm/s。模型各个 PART 对应的材料和属性如表 17-1 所示。

表 17-1　模型概要

Part 名称	Property 名称	Material 名称
foam_0301-42k100-01.prt	foam	foam
PCB	PCB	PCB
backshell_1002-42k10000-00.prt	backshell	HIPS
hornlink_ZHULV.PRT.1	prop_solid	steel
paperbox	paperbox	paperbox
front_shell_1001-42k10000-00.prt	frontshell	HIPS
ribshell_1021-42k10200-00.prt	ribshell	HIPS
lowsheet_1512-42k10000-01.prt	lowsheet	steel
1512-topyatiao.prt	topyatiao	steel
horn_1014-42K10000-00.PRT	horn	HIPS
horn_front_tet	horn_front	HIPS
LED	LED	LED
0301-42K100-01.PRT	plate0301	steel

STEP 01 导入网格

（1）打开 HyperCrash 11.0。
（2）在 User profile 中选择 RADIOSS V10。
（3）在 Unit system 中选择 N mm s T。
（4）单击 Run。
（5）单击下拉菜单 File→Import→RADIOSS。
（6）在弹出窗口中，选择 TV0525_0000.rad，并单击 OK。

STEP 02 创建材料并指定给零件

（1）单击下拉菜单 Model→Material。
（2）在 Choose Material Law 下方，单击 RADIOSS→Elasto-plastic→Cowper-Symonds（44）。
（3）按如图 17-8 所示进行参数设置。
（4）单击 Include picked parts（），并选择如图 17-9 所示的零件。
（5）进入 Tree 标签，选中对应的零件，单击按钮，仅显示选中的零件。
（6）单击右下角的 Yes，并单击 Save。
（7）在 Choose Material Law 下方，单击 RADIOSS→Elastic→Linear elastic（1）。
（8）按如图 17-10 所示进行参数设置。

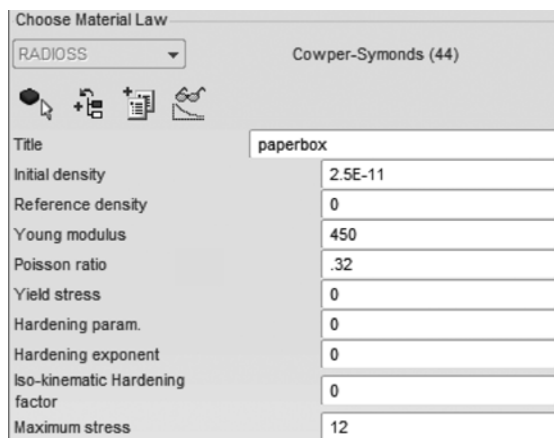


图 17-8　创建材料 LAW44

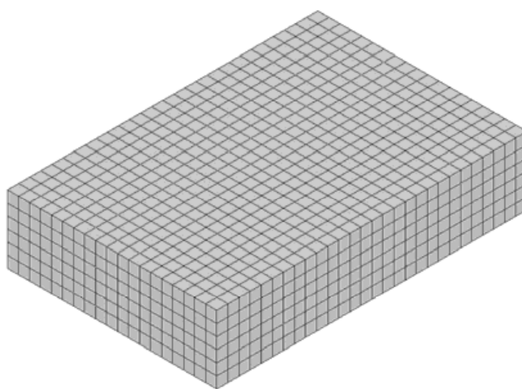


图 17-9　选择 PART

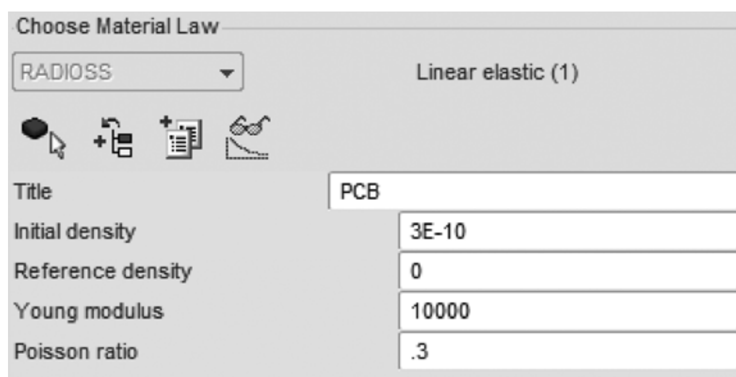


图 17-10　创建材料 LAW1

（9）单击 Include picked parts（），并选择如图 17-11 所示的零件。

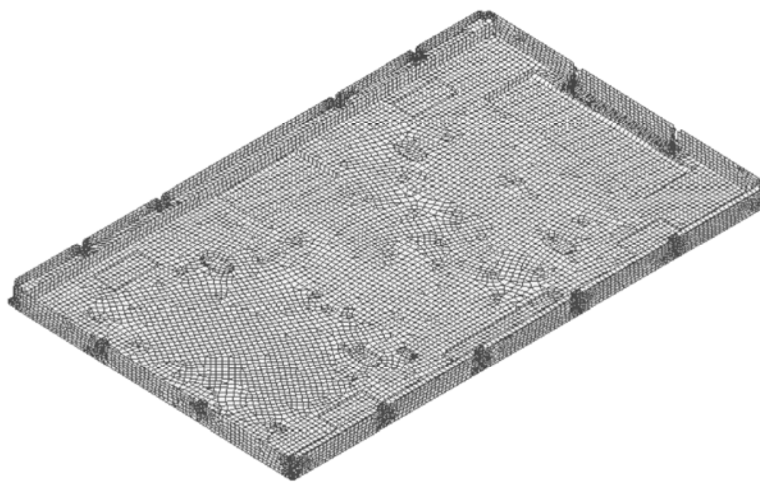


图 17-11　选择 PART

（10）单击右下角的 Yes，并单击 Save。

（11）在 Choose Material Law 下方，单击 RADIOSS→Visco-elastic→Close cell foam（33）。

（12）按如图 17-12 所示进行参数设置。

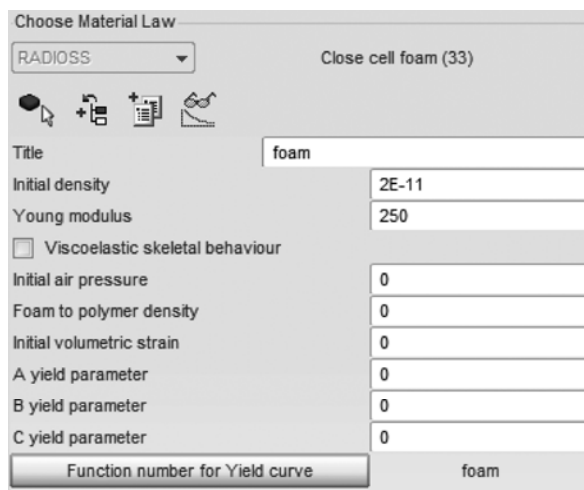


图 17-12　创建材料 LAW33

（13）单击 Function number for Yield curve，在弹出的窗口中单击左上角的 Import Curve（），在弹出的窗口中选择 foam 并单击 OK 退出 Function file 窗口，单击 Save 退出 Function Window。

（14）单击 Include picked parts（），并选择如图 17-13 所示的零件。

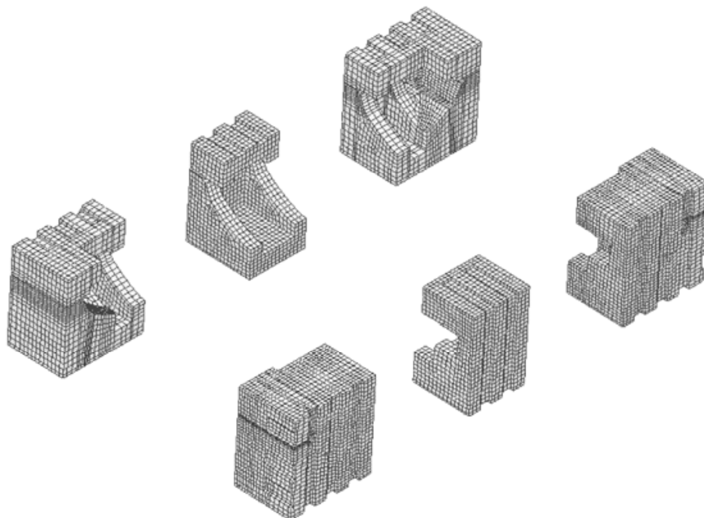


图 17-13　选择泡沫件

（15）单击右下角的 Yes，并单击 Save。

（16）按上述步骤，创建其他材料，并指定给对应的零件。

STEP 03 更新零件属性

（1）单击下拉菜单 Model→Property。
（2）在 Choose Property Law 下方，单击 RADIOSS→Volume→General solid（14）。
（3）按如图 17-14 所示进行参数设置。
（4）单击 Include picked parts（），并选择如图 17-13 所示的零件。
（5）单击右下角的 Yes，并单击 Save。
（6）在 Choose Property Law 下方，单击 RADIOSS→Surface→Shell（1）。
（7）按如图 17-15 所示进行参数设置。

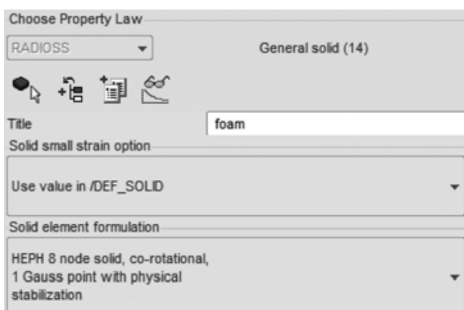


图 17-14　创建 SOLID 属性

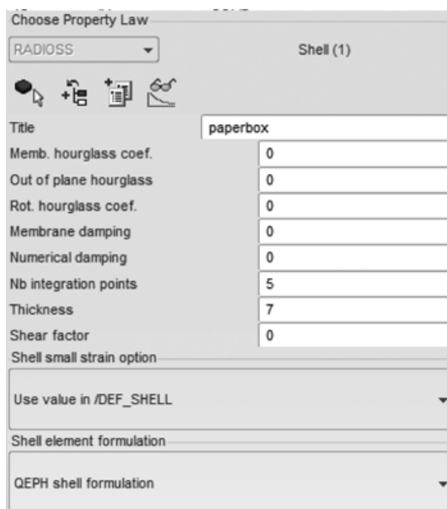


图 17-15　创建 SHELL 属性

（8）单击 Include picked parts（），并选择如图 17-9 所示的零件。
（9）单击右下角的 Yes，并单击 Save。
（10）重复上述步骤，按表 17-1 更新其他 PART 的属性。

STEP 04 创建一个 Rigid Wall

（1）单击下拉菜单 LoadCase→Rigid Wall→Create。
（2）按如图 17-16 所示进行参数设置。
（3）单击 Properties 标签，确认激活 Fixed。
（4）单击 Save 后再单击 Close。

STEP 05 定义初速度

（1）单击下拉菜单 LoadCase→Initial Velocity→Create。

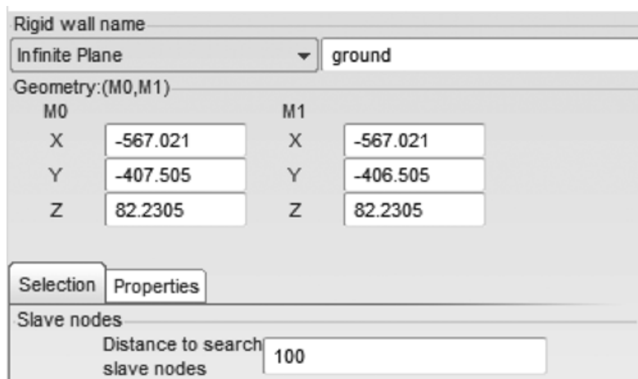


图 17-16　创建刚性墙

（2）设置 Vy 为–2 619。

（3）单击 Add selected parts by box（ ），然后选择所有零件。

（4）单击 Save 后再单击 Close。

STEP 06 定义接触

（1）单击下拉菜单 LoadCase→Contact Interface→Create/Modify。

（2）在 Choose Contact 下面选择 Multi usage（Type 7）。

（3）输入 Title 为 self_inter_internal

（4）激活 Self Impacted，在[Mast_ID]下单击 Add selected parts by box（ ），然后除最外部纸盒外的所有 PART。

（5）设置[GAP_MIN] =0.2，[FRIC]=0.2，[Iform] =2，单击保存。

（6）重复上述步骤，定义泡沫块与纸盒的接触，其中 Master 选择纸盒，Slave 选择泡沫块 PART，[GAP_MIN] =3.5。

（7）从下拉菜单中，单击 Mesh Editing→Clean。然后单击 Clean 并单击 Close。

STEP 07 定义加速度计

（1）单击下拉菜单 Data history→Accelerometer→Create。

（2）在弹出的加速度计定义界面，输入 back center_accelerometer，单击 OK 按钮。

（3）单击 按钮后，在图形区选择电视机背部中心点，单击 Save 按钮。

（4）在选取的位置可以见到加速度计标识，如图 17-17 所示。

（5）单击 Close 退出。

STEP 08 检查模型

（1）单击下拉菜单 Quality→Model Checker。

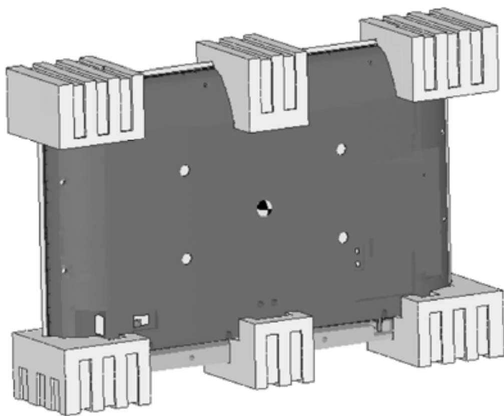


图 17-17　定义加速度计

（2）如有 Error 项，选择该项并单击 Correction（ ）以修复。

（3）单击 Close。

STEP 09 导出模型

（1）单击下拉菜单 File→Export→RADIOSS。

（2）指定路径和名称 TV0525_v10，单击 OK。

（3）在 Header of RADIOSS file 窗口中单击 Save Model。

（4）完成 Starter file 的保存。

（5）弹出 Write Engine File, V100，按如图 17-18 和图 17-19 所示进行参数设置。

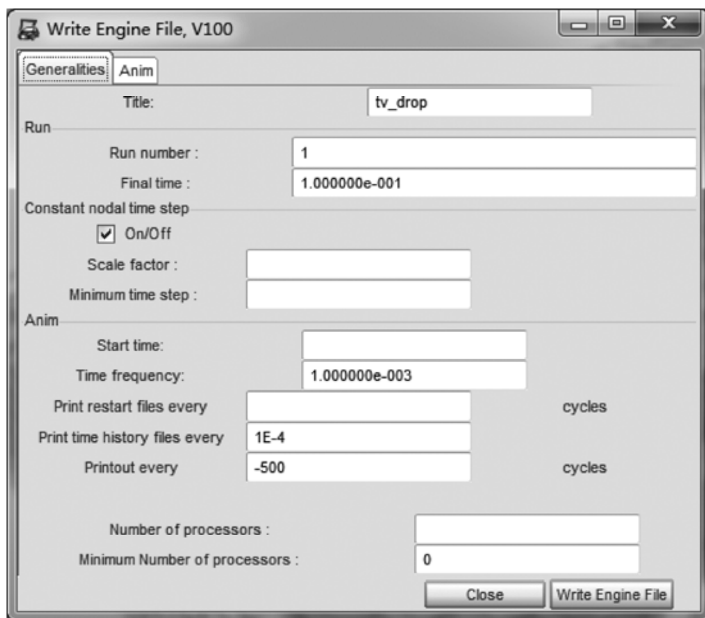


图 17-18　设置 Engine 文件

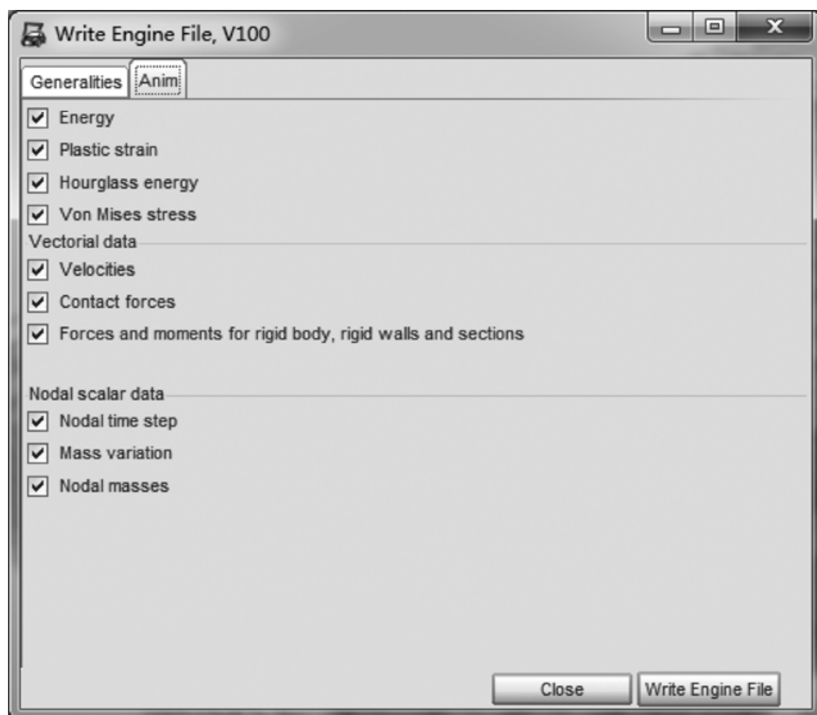


图 17–19　设置输出

（6）单击 Write Engine File。

（7）完成 Engine File 的保存。

STEP 10 运行计算

读者可自行将 Engine 文件 TV0525_v10_0001.rad 里加上时间步长控制卡片（如/DT/NODAL/CST 换行 0.9　2E-7），如图 17–20 所示，比较一下求解效率和结果。

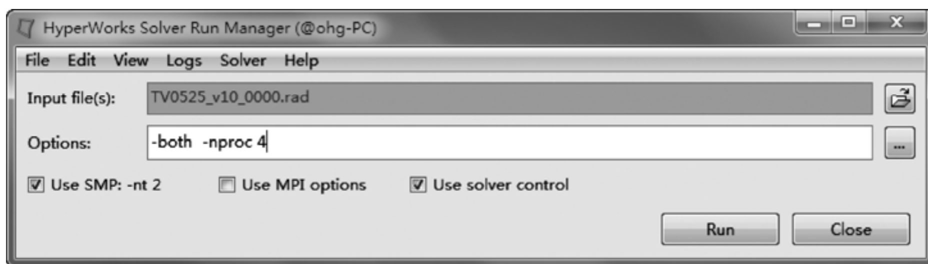


图 17–20　添加时间步长控制

STEP 11 查看结果

求解结束后，使用 HyperView 查看云图，并使用 HyperGraph2D 模块查看加速度计输出

的加速度信号，此处略过不提。

17.4 本章小结

本章概要地介绍了 RADIOSS Block 里的运动约束，对于常用的两种运动约束刚体和刚性墙进行了详细介绍。对于刚体，需要注意不同选项对质心、质量及主节点位置处理的异同。对于刚性墙，需要注意各种刚性墙的定义方法，以及作用范围。

带包装材料的电视机跌落试验仿真实例教程示范了典型跌落问题的建模方法、材料选用和接触定义设置。

第 18 章

接触



接触问题广泛存在于机械系统之中，如螺栓连接、齿轮啮合、冲压成形、汽车碰撞、飞机鸟撞、子弹穿甲等，其解法分为解析法（如 Hertz 公式）和数值方法两种。RADIOSS Block 中包含的接触处理数值方法有 3 种：拉氏乘子法、罚函数法和数值 Hertz 公式法。由于 Hertz 公式本身的理论假设是基于接触面之间的几何关系来判断接触是否发生，对于接触点不在构成接触面的节点上的常见情况，很难进行精确判断。对于二阶单元，中节点的存在和二阶插值公式可以一定程度的弥补这一问题，因此，RADIOSS Block 里还包含了针对二阶单元可以使用的 Hertz 公式接触算法。

本章重点知识

18.1　基本概念
18.2　绑定接触（Interface Type 2）
18.3　对称和非对称接触（Interface Type 3 和 5）
18.4　刚体接触（Interface Type 6）
18.5　通用接触（Interface Type 7）
18.6　边–边接触（Interface Type 11）
18.7　本章小结

对于更常见的显式求解问题，不能或不方便使用二阶单元，拉氏乘子法和罚函数法被广泛使用。其中，拉氏乘子法要求严格满足接触界面无穿透的约束条件，是精确算法，但是由于它引入了新的未知量，增加了方程组的未知量数量，在系数矩阵出现了非零元素，使有限元方程组不再解耦，因而导致问题求解更加困难。罚函数法不增加系统未知量，直接引入罚刚度与界面穿透量的乘积作为接触力，使得界面无穿透的约束条件近似满足（依赖于罚刚度的选择）。由于罚函数法不破坏有限元方程组的解耦特性，与显式算法的直接时间积分兼容，因此被显式有限元求解器广泛使用。

RADIOSS Block 有很多类接触（Interface），它们使用不同的类型编号来区别并命名，如 Interface Type 2、Interface Type 7 等。表 18−1 是 RADIOSS Block 现有接触类型的汇总。

表 18−1　RADIOSS Block 现有接触类型

Type	描　　述	应　　用	接 触 算 法
1/9	带滑动的 ALE/LAG	FSI（Fluid-stricture interaction）	主—从
2	绑定接触	固连接触	主—从或拉氏乘子
3&5	部件之间的接触碰撞	建议使用 Type 7	罚函数
6	刚性体之间接触	自定义接触	罚函数
7	通用的部件之间接触	适用所有速度下结构接触碰撞	罚函数或拉氏乘子
8	压延筋接触	冲压相关应用	罚函数
10	类似于 Type 7，但是固连	特殊用途	罚函数
11	线−线接触	用于 Beam，Bars 或 Spring	罚函数
16/17	节点与二阶 Solid/TShell 表面，或者二阶 Solid 单元之间	8 或 16 节点 TShell.或 20 节点 Solid	拉氏乘子
18	CEL 拉格朗日/欧拉接触	FSI	罚函数
19	通用接触	Type 7 + Type 11	罚函数
21	刚性主面与可变形从面	冲压相关应用	罚函数

尽管在严格意义上，Interface Type 2 属于拉格朗日网格之间的运动学条件（kinematic condition），不是真正意义的接触，但本书还是在本章对其进行介绍。Interface Type 4 是很陈旧的接触类型，已经不再建议用户使用，这里没有列在表 18−1 里。另外，Interface Type 14、15 是用于与 MADYMO 耦合专用接触类型，也未列在其中。

每种接触类型的开发都是针对某一特殊应用领域，但是对于实际问题中接触类型的选择，它们不应是选择的唯一依据，因为某些接触类型的固有算法局限还需要考虑。比如，Interface Type 3、5 和 6 的接触搜索是根据初始位置的最近原则进行的，计算效率很高，但在主表面高曲率时容易导致接触搜索错误。而 Interface Type 7，10，11 则不是这样，接触搜索是直接进行的，因此对发生接触的位置的判断是实时的，尽管接触搜索消耗了更多 CPU 时间。同时 Interface Type 3、5 和 6 对接触主从面的法向还有要求。

18.1　基本概念

基于罚函数法的接触类型都是基于主表面与从节点的处理方法：接触仅在一系列从节点和一系列主片（segment，又被称为段）之间发生。主片的定义与单元类型有关，如图 18−1

所示。如果是 3 节点或 4 节点 Shell 单元，单元的表面就是它的片。对于 Solid 单元，单元的每个表面都是一个片，对于 2D 的 Solid 单元（QUAD，平面应变单元），它的每条边都是一个片。

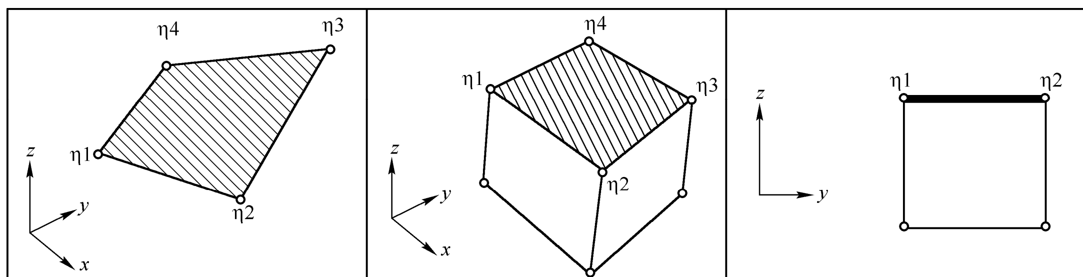


图 18−1　片的定义

Gap 是 RADIOSS Block 接触算法里非常重要的概念之一，它是用于判断从节点是否与主片发生接触的参考距离，可以理解为片或节点占据的“厚度”空间。当某个主片的从节点（已经定义过的）穿透（penetrate）到主片的由 Gap 决定大小的空间里，就认为该主片和该从节点发生了接触，如图 18−2 所示。一旦接触发生，罚函数接触算法就在发生接触的从节点在主片上的投影点上向该从节点施加一个使从节点的向外离开 Gap 空间的力，这个力的大小与从节点侵入这个 Gap 空间的大小有关，因此罚函数的作用机制就像是在从节点与其投影点之间施加了一个弹簧，以迫使主片和从节点之间保持接触界面无穿透条件，这个弹簧的刚度被称做接触刚度，如图 18−3 所示。

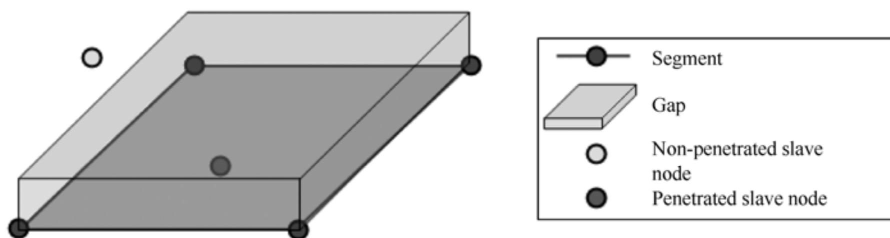


图 18−2　Gap 和穿透

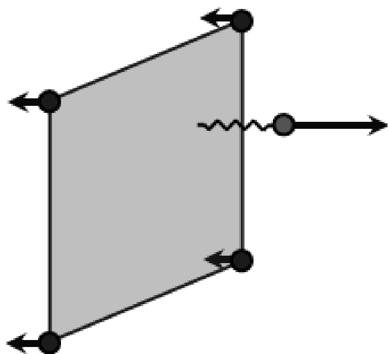


图 18−3　Interface 的反作用力

由于接触刚度的存在，从节点的临界稳定步长将受到影响。在接触发生后，从节点上被施加了一个弹簧，这个弹簧的刚度将被记入该节点的总刚度，根据第 14.3.1 节，该节点的临界稳定步长为

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2M_{\text{node}}}{K_{\text{node}} + K_{\text{spring}}}}$$

可见，该节点的临界稳定步长将减小。当从节点完全离开 Gap 空间后，这个接触对终止，同时弹簧机器作用力已被移除，从节点的时间步长恢复正常。

同时，整个罚函数法的作用过程，并不是像运动学条件那样将从节点绑定到主片（从节点自由度被移除），因而这种基于罚函数的接触类型可以和所有的运动学条件（如刚体、强制速度等）完全兼容。

与罚函数法不同，拉氏乘子法（使用/LAGMUL 和/INTER/LAGMUL 调用）是纯数学方法，不要引入弹簧来模拟接触行为，接触条件是通过求解非线性方程组得到满足的。因此，它不存在因为接触刚度增加而导致的时间步长下降问题，但是需要在每个循环里用更多 CPU 时间来求解非线性方程组。明显的，这种方法的优势是从节点将停留在接触面上，接触条件得到严格满足，但是它计算消耗很大，同时它不能计入摩擦。

18.2　绑定接触（Interface Type 2）

Interface Type 2 又被称做绑定接触，如前所述，它是一种节点运动约束：一系列从节点被刚性连接到主表面上。从节点的力和力矩被转移到主表面上，并根据主节点的运动强制运动，如图 18-4 所示。因此，它不能与其他的运动约束条件兼容。这种接触可以保证力和力矩的平衡。

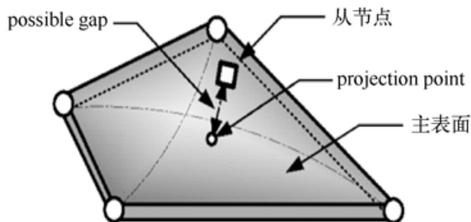


图 18-4　Interface Type2 绑定接触

请注意：最新的 RADIOSS Block 11.0 里 Interface Type 2 增加了罚函数算法（$Spot_{flag}$=25）。在这种算法下，它归类于罚函数算法的接触类型，可以与其他的运动约束条件兼容。

常用的 Interface Type 2 有两种公式，都是基于运动学约束的类型。

1．默认的点公式（$Spot_{flag}$=0）

$Spot_{flag}$ 设为 0 时，基于 Interface Type 2 的点焊是默认的公式，如图 18-5 所示。

（1）基于单元形函数。

（2）对与减缩积分单元会造成沙漏。

（3）连接刚度从节点局部的函数。

（4）建议主片使用全积分 Shell 单元算法。

（5）建议用于连接块体单元的从节点到块体单元的主片上（网格过渡而没有转动自由度）。

2．优化的焊点公式（$SPOT_{flag}$=1）。

$Spot_{flag}$ 设为 1 时，基于 Interface Type 2 的点焊是优化的公式，如图 18-6 所示。

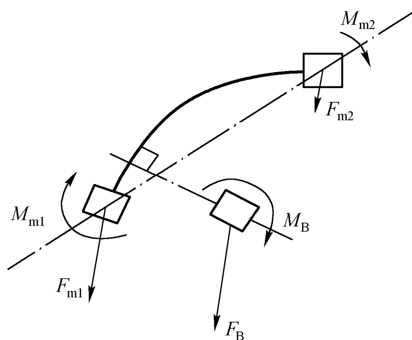


图 18-5　$Spot_{flag}$=0 的情况

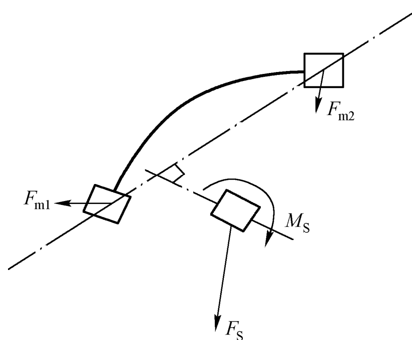


图 18-6　$Spot_{flag}$=1 的情况

（1）基于单元平局刚体运动。
（2）无沙漏问题。
（3）连接刚度恒定。
（4）建议主片使用减缩积分 Shell 单元算法。
（5）建议用于连接 Beam，Spring，Shell 上的从节点到块体单元的主片上。

18.3　对称和非对称接触（Interface Type 3 和 5）

18.3.1　对称接触（Interface Type 3）

对称接触（Interface Type 3）用于模拟两个表面之间的对称接触，如图 18-7 所示。两个表面都是通过一系列的带方向的片组成，因此这种接触是单边的，即片的另一侧不发生接触。两个表面的每一个节点将被同时认为是主面，而主面的任一节点也会被同时认作从节点。

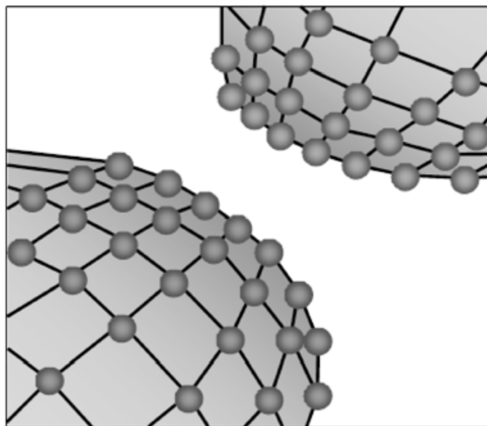


图 18-7　Interface Type 3 对称接触

与 Interface Type 5 不一样的是，Interface Type 3 里有两个主表面，接触算法执行了两次：第一次求解第一个主表面的节点和第二个主表面的接触，第二次求解是第二个主表面的节点和第一个主表面的接触。这种对称的处理方法相比于 Interface Type 5 有更高的精度，但是 CPU 时间也更多。

一旦检测到接触，一个通过两个主表面刚度计算得到的弹簧就被施加到它们之间，每一侧主表面的刚度由它的材料、几何属性来计算，而总的接触刚度为

$$K = s\frac{K_1K_2}{K_1 + K_2}$$

为了稳定性，一般不建议修改刚度缩放因子 s 的默认值（0.2）。但是对于 K_1 比 K_2 大 100

倍（或者是 0.01 时）时，建议增大刚度缩放因子以避免过多的穿透。因为在这种接触算法里，接触刚度是恒定的，由主表面的单元大小、材料性质和几何属性确定。两个主表面的刚度相差太大时，可能会导致节点穿过另一个主表面的中面。

Interface Type 5 还不允许一个节点同时属于两个主表面，即它不支持自动接触。它主要用于板壳结构的初始接触。如果两块板初始状态就有非零的间隙，最好使用 Interface Type 7，否则，Interface Type 3 是个不错的选择。

18.3.2 非对称接触（Interface Type 5）

非对称接触（Interface Type 5）用于模拟一组从节点和一个主表面之间的单向接触关系，接触仅发生在主表面一侧，因而主表面的法向必须指向从节点，如图 18−8 所示。

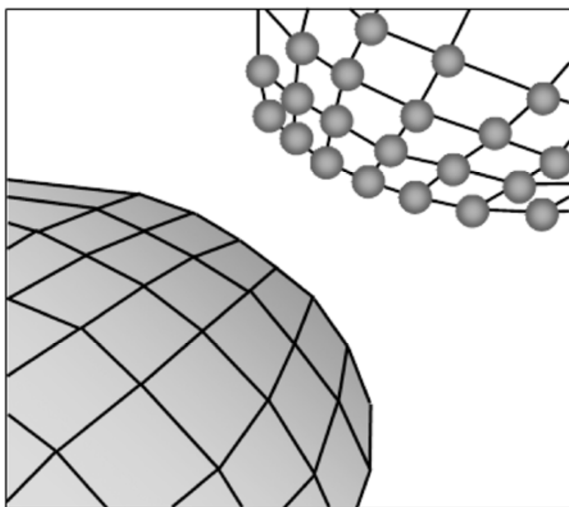


图 18−8　Interface Type 5 非对称接触

Interfacetype 5 主表面的网格必须是长宽比合适的规则网格，适用于主片来自于 Solid 或 Shell 单元，并且从节点和主表面不能连在一起，即从节点不能同时位于主表面上。有时，Interface Type 5 还用于替代刚性墙，这样就能解决刚性墙这种运动约束条件和其他运动约束条件（如节点刚体等）的不兼容问题。

Interface Type 5 是基于 Gap 来确定接触是否发生的，这个用户定义的 Gap 是在主表面一侧，建议使用很小的或者 0 值的 Gap。一旦检测到接触，一个仅通过主表面刚度计算得到的弹簧就被施加到它们之间，主表面的刚度由它的材料、几何属性来计算。处于稳定性的，在这个主表面的刚度被乘以一个 0.2 的缩放因子。一般不建议用户调整这个缩放因子，除非是主表面相对于从节点一侧很软的情况。在这种情况下，建议使用一个较大杨氏模量与较小杨氏模量的比值作为接触刚度缩放因子。

如前文所述，接触表面的接触刚度是由其几何与材料性质以及单元类型决定的，表 18−2 列出了不同单元类型片的接触刚度计算方法。如果一个接触片同时与 Solid 单元和 Shell 单元相连（例如，Solid 单元被覆盖了一层 Shell 单元），那么刚度处理时以 Shell 单元考虑。

表 18−2　不同类型单元片的刚度计算

ELEMENT	STIFFNESS
(shell)	$K=s\frac{Et}{2}$ $\begin{cases} E\text{: Young's modulus} \\ t\text{: shell thickness} \end{cases}$
(solid)	$K=s\frac{BA^2}{2V}$ $\begin{cases} B\text{: Bulk modulus} \\ A\text{: Segment area} \\ V\text{: Element volume} \end{cases}$
(beam)	$K=sE\sqrt{S}$ $\begin{cases} E\text{: Young's modulus} \\ S\text{: Section area} \end{cases}$
(spring)	$K=\max(K_t)$　K_t:translational stiffness

Interface Type 5 的主要不足是接触只能发生在主面的一侧（即主片的正法向一侧），而不是两侧，对于大转动问题（大部分碰撞问题都带有大转动），接触会发生主片的另外一侧，而这时 Interface Type 5 不能正确地识别穿透。Interface Type 5 的另一个问题是一个节点不能同时是从节点和主片，即 Interface Type 5 不能自动接触仿真。因此，对于复杂接触问题，在定义正确的接触面之前，有必要对接触的影响进行了解。

18.3.3 使用 Interface Type 3 和 5 的注意事项

在使用 Interfaces Types 3 和 5 这两种接触类型时，需要注意它们有 3 个共同的问题。

1．能量跳动

Interface Type 3 和 5 的 Gap 是单侧的，单元的边（edge）是不考虑的，在非平直的主表面的单元的边上，Gap 是不连续的，如图 18−9 所示，这样会导致局部的能量跳动，尤其在 Gap 值很大时。

2．不正确的接触处理

Interface Types 3 和 5 这两类接触算法的接触刚度是恒定的，这样就会允许（导致）从节点穿过主表面，在接触刚度提供的反力不足够超过导致从节点继续侵入的外力时，尽管这个问题可以通过调整默认的接触刚度参数（如接触刚度缩放因子）得到修正，但是需要提前对问题有所理解且需要一定的经验。一旦发生穿透，尤其是穿透之后从节点又发生了滑动的情况，这样得到的计算结果就是不准确的。图 18−10 的例子就说明了这

种情况：接触刚度不足导致从节点穿透主表面，之后从节点发生滑动，导致错误的接触处理。

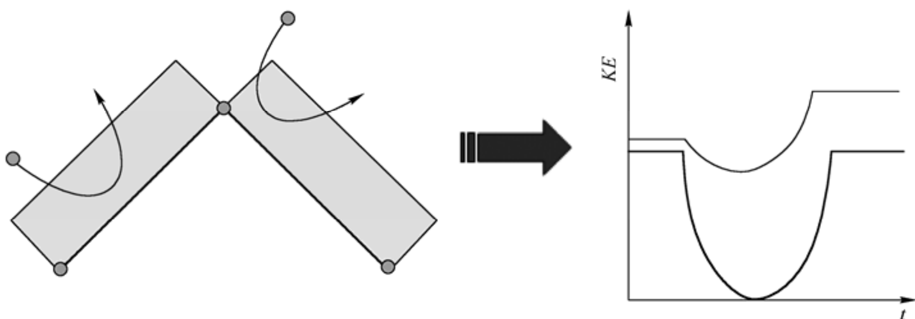


图 18-9　能量跳动

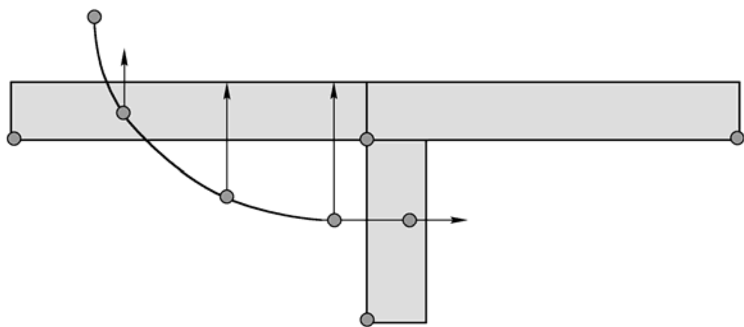


图 18-10　不正确的接触处理

3．接触搜索的限制

Interface Type 3 和 5 这两种接触的搜索算法里最近主控节点（主表面上与从节点作用的控制节点）的判断都是依据前一次搜索的主片沿其拓扑得到的有限拓扑搜索算法（Topologically Limited Search Algorithm）。在 RADIOSS Starter 执行块预处理模型后，每个从节点都被按照最近原则确定初始的主控节点，在 Engine 执行块求解过程中，每个从节点的主控节点将被依照有限拓扑原则确定新的主控点：这个新的主控点是在主表面上离上一个主控点拓扑最近的点。这种接触搜索需要的 CPU 时间很少，但是可能导致不正确的结果，尤其是在主表面的曲率很大时。

图 18-11 示意了这个问题：从节点 N 在初始时刻位置在 N_{t0}，按最近原则确定的初始主控点是 M_0；当 N 运动到 N_{t1} 位置后，按有限拓扑搜索，确定了此时从节点 N 的主控节点是 M_1，因为 M_1 是主表面上同一方向上离上一个主控点 M_0 最近的节点；节点 N 继续运动到 N_{t2}，有限拓扑搜索将会把 M_2 节点当做节点 N 此时的主控节点，而事实上片 S 是此时离节点 N 最近的主片，但是有限拓扑不会搜索到距 M_1 更远的 S 片，还是把 M_2 当做主控节点。

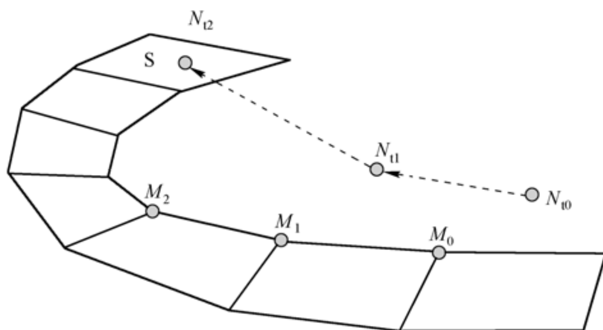


图 18-11　不正确的接触搜索

由此可见，对于不均匀网格、大曲率几何、大滑移问题，这种搜索限制导致错误接触的可能性更大。

18.4　刚体接触（Interface Type 6）

Interface Type 6 用于模拟刚体之间的接触，其工作原理和 Interface Type 3 相似，除了接触刚度是由用户输入的力—穿透深度曲线决定的以外，如图 18-12 所示。这种接触在车辆乘员仿真方面有特别用处，比如膝垫。其主要不足是接触主面和从面都必须是刚体或其一部分，且两个表面的法向必须相对。

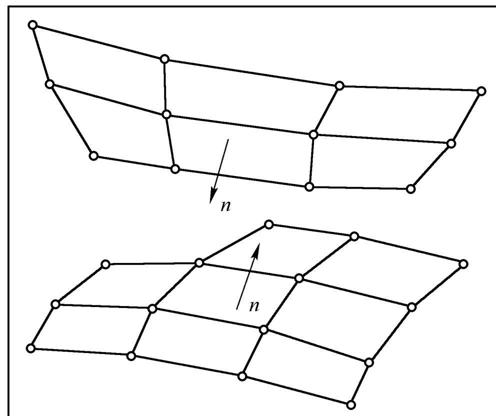


图 18-12　Interface Type 6 刚体接触

接触刚度由用户输入的力—穿透深度曲线确定，在任意瞬时的接触刚度是当下穿透量下曲线的切线斜率。同样的，这个接触刚度会计入影响稳定时间步长，即

$$\Delta t = 0.1\sqrt{\frac{M}{K}}$$

其中，M 是两个刚体的质量的较小值，K 是力—穿透量曲线的切线斜率。

18.5　通用接触（Interface Type 7）

Interface Type 7 是通用接触，能够模拟所有点面类型的接触，如图 18-13 所示。与 Interface Type 3 和 5 不同，Interface Type 7 不是定向接触，从节点可以同时在主表面上，因此它可以模拟自动接触和自接触，尤其是高速碰撞的屈曲问题。

Interface Type 7 解决了 Interface Type 3 和 5 所有的不足和限制：接触搜索不是最近拓扑方法，而是采用直接搜索，这样就没有任何搜索限制，所有可能发生的接触都会被正确识别出；在 Shell 单元的边上引入圆柱面 Gap，解决了能量跳动问题；最后，Interface Type 7 主要的优点是引入了变化的接触刚度——接触刚度随着从节点对 Gap 空间侵入量

的增加而呈指数形式增大，从而保证了从节点不可能穿过主面 Shell 单元的中面，接触处理的问题得到解决。

Interface Type 7 的 Gap 和之前几种接触不同：Gap 被施加在 Shell 单元中面的两侧，在 Shell 的边上使用了圆柱面的 Gap，如图 18−14 所示。

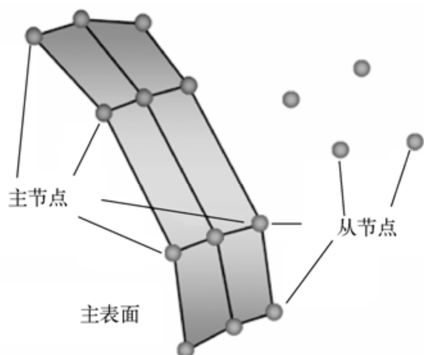


图 18−13 Interface Type 7 通用接触

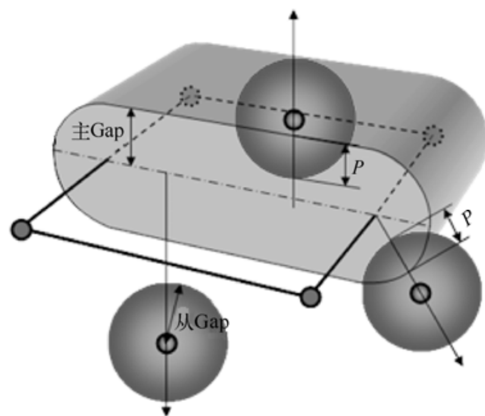


图 18−14 Interface Type 7 的 Gap

Shell 单元的边使用圆柱面 Gap，可以避免 Interface Type 3 和 5 使用单侧 Gap 带来的能量跳动个问题：当节点滑过 Shell 的边时，圆柱面 Gap 的存在使得接触作用是连续的，对靠近主面上 Shell 的边的从节点，也会按照侵入圆柱面 Gap 的大小受到相应的接触力，如图 18−15 所示。

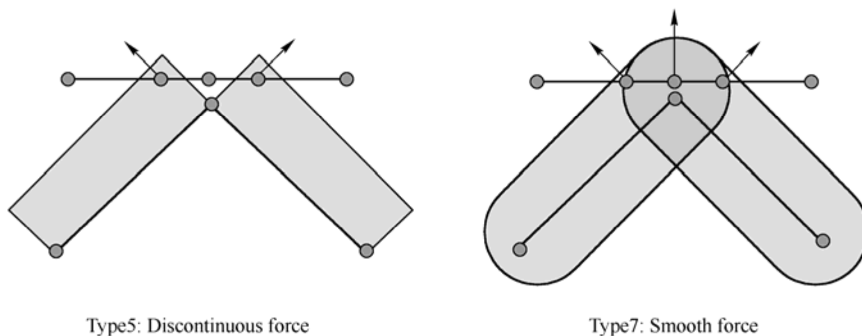


图 18−15 节点滑过圆柱 Gap

18.5.1 Gap

与 Interface Type 3 和 5 不同的是，Interface Type 7 能够使用可变 Gap，对于每一个接触，用于判断接触发生的 Gap 默认等于由主面 Gap（g_m）和从节点 Gap（g_s）之和。表 18−3 给出了不同单元类型在充当主面和从节点时自身 Gap 的计算。

表 18-3　不同类型单元的 Gap

单 元 类 型	主面 Gap（g_m）	从节点 Gap（g_s）
SHELL	$t/2$，t 是主片单元的厚度	$t/2$，t 是从节点所在 Shell 单元的最大厚度
TRUSS 和 BEAM	不能做主片	$\sqrt{S}/2$，S 是截面积

如果 Interface Type7 还使用了激活接触作用的最小 Gap（Gap_{min}），那么计算使用的可变 Gap 将不会小于 Gap_{min}，同时 Interface Type 7 还允许施加一个 Gap 的缩放因子和定义一个最大的 Gap（Gap_{max}）。根据卡片/INTER/TYPE7 里参数 Igap 值的不同，该接触实际使用的 Gap 的定义如下：

（1）Igap=0 时，使用恒定的 Gap，其大小等于 Gap_{min}。

（2）Igap=1 时，使用可变 Gap，Gap=Max(Gap_{min}, (g_s+g_m))，可变 Gap 不小于 Gap_{min}。

（3）Igap=2 时，使用可变 Gap，考虑缩放因子和 Gap_{max}，Gap=Max(Gap_{min}, Min(s*(g_s+ g_m), Gap_{max}))，可变 Gap 不小于 Gap_{min}。

（4）Igap=3 时，使用可变 Gap，考虑缩放因子，Gap_{max} 和单元尺寸，Gap=Max(Gap_{min}, Min s *(g_s + g_m), %mesh_size *(g_{s_l} + g_{m_l}), Gap_{max}))，可变 Gap 不小于 Gap_{min}。

18.5.2　初始穿透

对有限元模型而言，初始穿透是由于网格划分过程的离散导致的，如图 18-16 所示，是不可避免的常见现象。

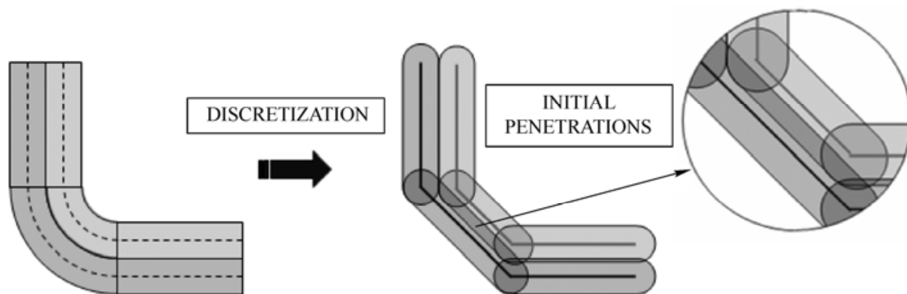


图 18-16　网格离散导致初始穿透

Interface Type 7 通过卡片参数 Inacti 可以对初始穿透进行 3 类特殊种处理：将发生初始穿透的从从节点或主面单元的刚度移除，自动调整节点坐标以消除初始穿透；可以移动有初始穿透的从节点或者主表面；对可变 Gap 进行修正以新的可变 Gap 进行接触激活的识别。模型采用何种方式处理初始穿透决定于/INTER/TYPE7 卡片的 Inacti 参数。

（1）当 I_{nacti}=0 时，不处理初始穿透。

（2）当 I_{nacti}=1 时，关闭初始穿透从节点的刚度。

（3）当 I_{nacti}=2 时，关闭初始穿透主片单元的刚度。

（4）当 I_{nacti}=3 时，自动调整初始穿透的节点的坐标，以移除初始穿透。

（5）当 I_{nacti}=5 时，使用随时间可变的接触 Gap，初始 Gap 被初始穿透量修正：Gap0 = Gap – P0，其中 P_0 是初始穿透量。

（6）当 I_{nacti}=5 时，使用随时间可变的接触 Gap，初始 Gap 被初始穿透量修正：Gap_0 = 95%（Gap – P_0），如图 18−17 所示。

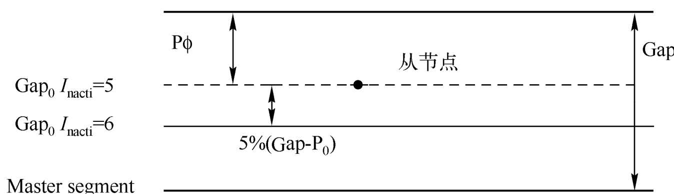


图 18−17　当 I_{nacti}=5 和 6 时的情况

如果有限元网格模型质量较高，且 Interface Type 7 的 Gap 设置合理，I_{nacti}=0 是较好的选项；I_{nacti}=1 或 2 在仅有少量初始穿透节点的情况下可以使用，但是如果初始穿透的节点和单元较多，移除它们的刚度后，会产生较大的接触问题；I_{nacti}=3 选项在使用时需要当心，应避免移动初始穿透节点坐标后的网格与原始网格发生较大偏差，即初始穿透量不应太大，同时，如果某些初始穿透的节点是 Spring 单元的端点，则节点坐标的调整会使 Spring 单元“创造”出非物理的初始能量；对于 I_{nacti}=5 选项，如果被修正后的 Gap_0 还足够大（指的是不引起接触刚度和时间步长的问题），那么这个选项的接触结果精度是较好的；如果被修正后的 Gap_0 依然足够大，则建议使用 I_{nacti}=6 选项替代 I_{nacti}=5 选项，因为 I_{nacti}=6 选项避免了接触计算的高频影响。

图 18−18 示意了 I_{nacti}=5 是如何更新随时间可变的 Gap 的过程的：在 t=0 时，某个节点有初始穿透，于是它的初始 Gap 被自动修正。在随后的时间里，这个修正的初始 Gap 将在每次远离主片时增大一次，直到完全恢复到原始设定的 Gap。这个作用机制主要应用在气囊展开仿真中，它可以在所有节点都有很大初始穿透的展开初期，使 Interface 获得一个合理的时间步长，如图 18−19 所示的那样。

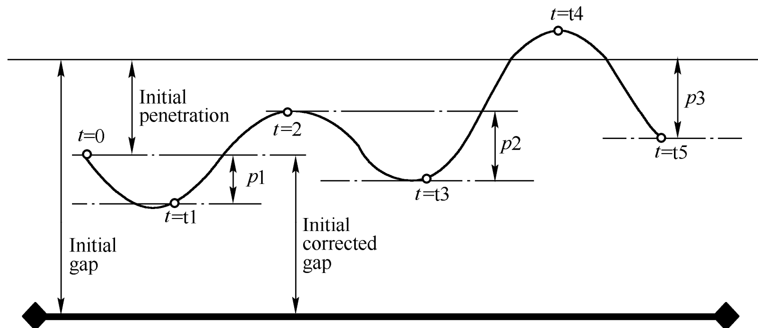


图 18−18　随时间可变的 Gap

需要强调的是：尽管 Interface Type 7 提供了丰富的选项和功能来处理模型的初始穿透，但还是强烈建议在创建有限元模型时，通过前处理工具（如 HyperMesh 或 HyperCrash）由用户自主进行初始穿透的消除。

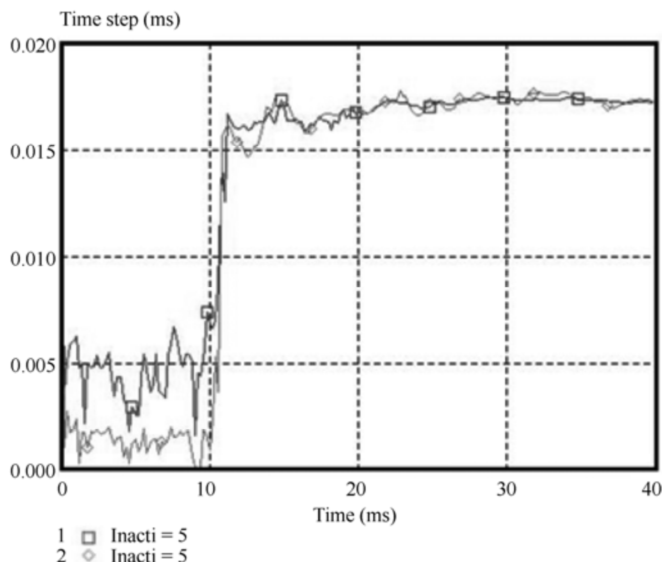


图 18-19　使用 Inacti=5 对时间步长的影响

18.5.3 接触刚度

同其他使用罚函数法的接触类型一样，在检测到接触发生（节点侵入接触的 Gap 空间）后，Interface Type 7 的从节点与主片之间也会施加一个弹簧，但是 Interface Type 7 的接触刚度（弹簧刚度）是侵入量的函数，接触作用力得到了更好的近似。这个弹簧力是节点侵入量的非线性函数，随着侵入量的增大而呈指数形式增大，如图 18-20 所示。

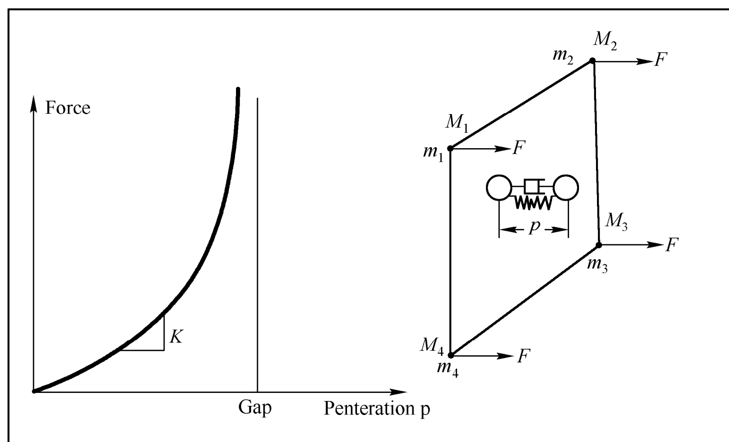


图 18-20　Interface Type 7 的接触力

在从节点的侵入量是 P 时，考虑到侵入速度带来的粘性阻尼，总的接触力为

$$F = K \cdot P + C\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}$$

其中，$K = K_i \dfrac{Gap}{Gap - P}$，$C = VIS_s\sqrt{2KM}$ 。

由此，瞬时刚度为

$$K_t = \frac{\partial F}{\partial P} = \frac{K_i \cdot Gap^2}{\left(Gap - P\right)^2}$$

如果穿透量较大，那么节点的临界时间步长将受到影响，因为在节点的临界稳定步长的确定是考虑该节点上的接触刚度的（参见第 14 章）。为此，可以通过增大 Gap 和增大初始接触刚度（设置使用参数 Stfac）来减小接触刚度。两种方法都允许接触吸收更少的能量并使接触过程更加平滑。增大 Gap 可以使从节点在更小的距离内减速，从而减小了穿透量。

需要说明的是：如果模型使用了单元步长进行计算，但是模型含有 Interface Type 7 接触，那么节点时间步长将会被自动计算，最小的那个步长将被用做模型的实际步长。与 Interface Type 5 相反，一个小于 1.0 的系数 Stfac 会使第一次接触发生大的穿透，导致很大的接触刚度和作用力。为避免大的穿透，建议设置 Stafc 参数大于或者等于 1.0，图 18−21 解释了这一点。增大初始接触刚度，尽管会在穿透的开始导致小的时间步长，但是能够在穿透量较大的情况下增大时间步长。

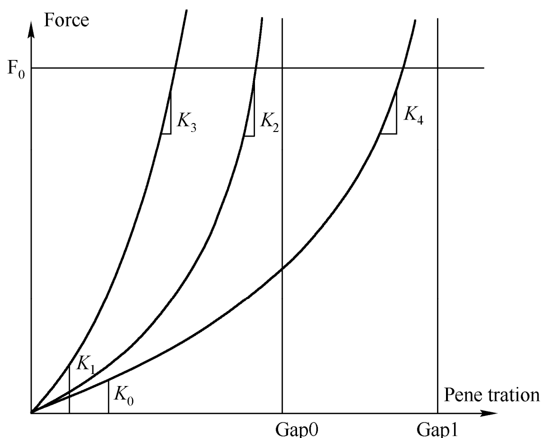


图 18−21　力−穿透量曲线

18.5.4 摩擦

RADIOSS Block 力有几种摩擦公式，最简单也最常用的一种是库伦模型。这种摩擦公式仅需要一个参数（库伦摩擦系数μ），它能够对常见碰撞问题给出精确的结果。

库伦摩擦系数 μ 的默认值是 0（即表面之间无摩擦）。为了计算摩擦力，默认的摩擦罚函数公式是基于切向速度的粘性形式。如图 18−22 所示，在节点从位置 C_0（t 时刻的接触点）滑动穿透到位置 C_0（时刻 $t+t_0$ 的接触位置），由于接触粘性的，这里引入一个粘性系数 C_t 来计算附着力，如图 18−23 所示。

$$F_{ad} = C_t \cdot V_t$$

其中，$C_t = VIS_F\sqrt{2KM}$，K 是瞬时接触刚度，VIS_F 是接触摩擦的临界阻尼系数，M 是主节点质量。

附着力（F_{ad}）计算出来后，如果它比μF_n 小，则摩擦力不变（仍然等于 F_{ad}），并且依然保持粘着。如果附着力大于μF_n，那么摩擦力就要减小为μF_n，如图 18−24 所示。

$$F_t = \min(\mu F_n, F_{ad})$$

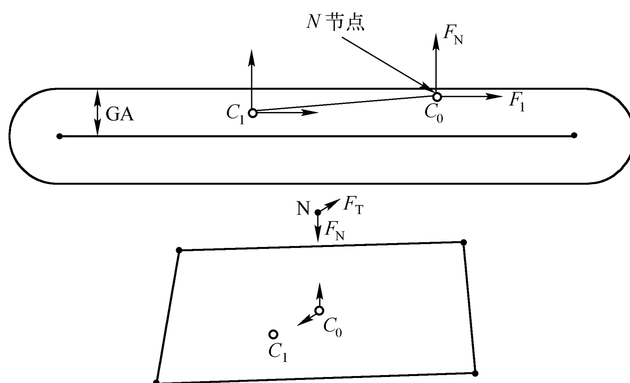


图 18-22　作用在节点上法向力和切向力

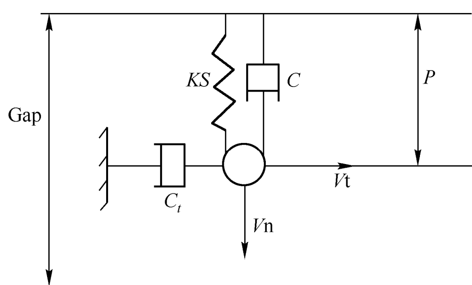


图 18-23　附着力计算

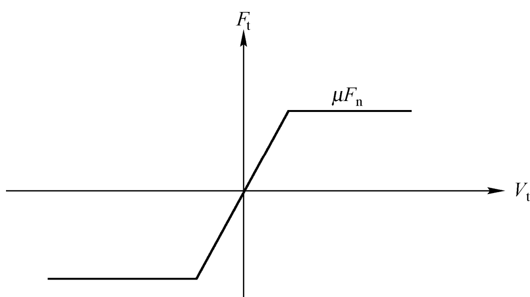


图 18-24　摩擦力计算

如果相对滑动速度很低（例如，准静态问题仿真），那么默认的基于切向速度的粘性公式将不起作用。为了克服这个问题，RADIOSS Block 提供一种新的基于切向位移的罚函数法（刚度增量公式），在 Interface Type 7 的卡片参数 Iform=2 选项中可以激活这种公式。它引入一个构造的刚度 K 来计算摩擦力的变化：

$$\Delta F_t = K_s \cdot \delta_t$$

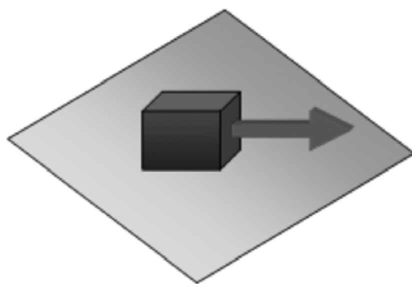
其中，δ_t 是切向位移。

与之前的粘性公式相反，基于刚度的公式在速度很低的情况下，也能正确地计算摩擦力。图 18-25 的例子就说明这一点：块体被施加了一个速度很低（比如 0.01m/s）的强制位移，在底板上滑动，右边的摩擦力曲线显示粘性公式计算的摩擦力不正常，而刚度公式则正确地反映了物理情况。

除了库仑摩擦模型，RADIOSS Block 还有 3 种其他的摩擦模型可供选择。它们的原理与库伦模型摩擦相似：RADIOSS Block 首先计算附着力，然后与μF_n比较。不同之处在于摩擦系数（μ）不再是恒定的，而是主片上法向压力和从节点切向速度的函数。根据卡片参数 Ifric 的不同，可用的 3 种摩擦公式如下。

（1）广义的粘滞摩擦公式：$\mu = Fric + C_1 \cdot p + C_2 \cdot V + C_3 \cdot p \cdot V + C_4 \cdot p^2 + C_5 \cdot V^2$

（2）Darmstad 摩擦公式：$\mu = C_1 \cdot e^{(C_2 V)} \cdot p^2 + C_3 \cdot e^{(C_4 \cdot V)} \cdot p + C_5 \cdot e^{(C_6 \cdot V)}$



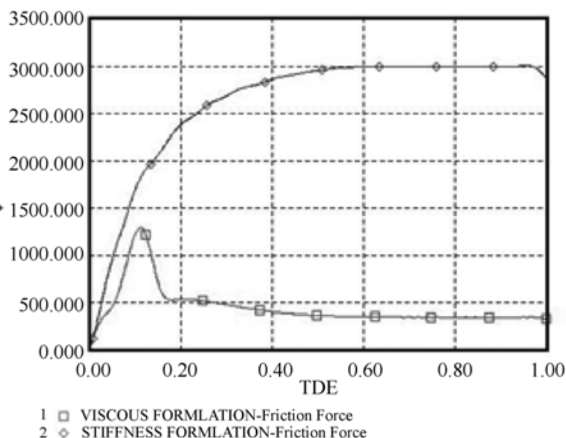


图 18−25　粘性公式和刚度公式

（3）Renard 摩擦公式，如图 18−26 所示

$$\mu = C_1 + (C_3 - C_1)\cdot\frac{V}{C_5}\cdot\left(2-\frac{V}{C_5}\right),\ V\in[0,\ C_5]$$

$$\mu = C_3 - \left((C_3 - C_4)\cdot\left(\frac{V-C_5}{C_6-C_5}\right)^2\cdot\left(3-2\cdot\frac{V-C_5}{C_6-C_5}\right)\right),\ V\in[C_5, C_6]$$

$$\mu = C_2 - \frac{1}{\dfrac{1}{C_2-C_4}+(V-C_6)},\ \mathrm{V}\geqslant C_6$$

其中，$p = C_1\mu + C_4\rho C\upsilon T = C_1\mu + \alpha\upsilon T$ 。

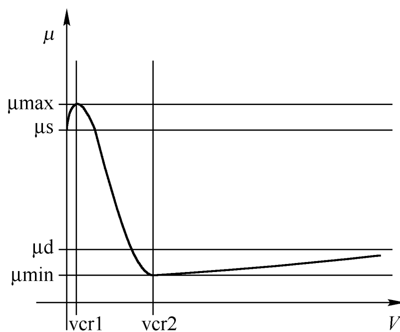


图 18−26　Renard 摩擦公式的图像表达式

另外，所有的摩擦公式都可以进行摩擦滤波以光顺摩擦力，请查阅帮助文档 /INTER/TYPE7 卡片的参数 I_{filtr} 和参数 X_{freq}。

18.5.5 时间步长控制

前面的章节里我们已经解释了由于所有穿透节点的接触刚度被纳入其临界时间步长的计

算，节点时间步长可能会被接触因素剧烈减小。同时，为了阻止节点在一个积分时间循环内穿过主片，还需要计算一个运动的时间步长。如果检测到节点当前侵入速度在当前的时间步长下，能够在下一个同样步长的时间循环里穿过主片，那么 RADIOSS 会减小下一个时间步长，以保证有剩余的 Gap 空间可以向该节点施加罚函数接触力，以迫使其减速或停止穿过趋势。如果 P 是 Gap 空间的侵入量，$\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$ 是当前侵入速度，那么运动时间步长是继续侵入当前位置到主片一半距离所用的时间，请见图 18−27 的解释。这个时间步长也是为了保证数值稳定的，因此，模型计算的稳定时间步长是各个临界步长中的最小值。

$$\mathrm{d}t_{\mathrm{nodal}} = \sqrt{\frac{2M_{\mathrm{nodal}}}{K_{\mathrm{interface}} + K_{\mathrm{element}}}} \qquad \mathrm{d}t_{\mathrm{kin}} = \frac{1}{2}\left[\frac{\mathrm{Gap} - p}{\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}}\right]$$

Nodal time step during contact　　　　Kinematic time step

图 18−27　运动时间步长

在汽车碰撞仿真中，运动时间步长（有时称为 Interface 时间步长）不会控制计算的时间步长，即它不是各个临界步长中的最小值。如果它被激活为模型求解过程的时间步长，一般是由模型质量引起的。

如果由于某种原因，则节点有很大的穿透，节点时间步长或运动时间步长变得很小，可以在 Engine 文件中使用卡片/DT/INTER/DEL，将时间步长很小的节点从接触对里释放出来。所有时间步减小到 $\mathrm{d}t_{\mathrm{min}}$ 的节点将被从 Interface 里移除。这个选项对于保持接触过程的合适时间步长有用，但是当释放的节点太多时，可以预见的是计算结果很糟糕。下面的信息提示了节点的释放：

```
**WARNING MINIMUM TIME STEP XXX IN INTERFACE 1

REMOVE SLAVE NODE XXX FROM INTERFACE
```

18.5.6 质量增加

使用质量缩放（选项/DT/NODA/CST）会导致质量的不稳定。节点进一步侵入接触的 Gap 空间，则该节点的瞬时接触刚度增大，节点总刚度增大，从而节点的时间步长降低。为了满足质量缩放要求的最小时间步长，RADIOSS Block 将在节点上增加质量。然而，增加了质量会导致节点动能和动量增加，而这两项物理量的增加会使得节点的 Gap 侵入量更大，如图 18−28 所示。

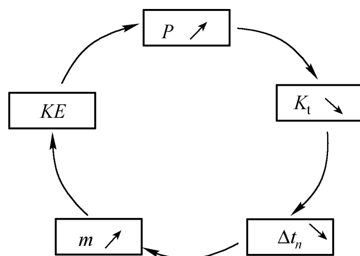


图 18−28　质量缩放对 Interface Type 7 的影响

除非接触力能够“阻止”这个侵入运动，否则，增加的质量（由于使用质量缩放导致的）将会变得越来越大。于是，计算一般会停下，因为质量增量很快（几个循环）

变得非常巨大。这时，Interface 应该需要进行修改。

（1）应该增大 Gap。

（2）增大初始接触刚度。

（3）网格模型应该细化，并在接触区域均匀化。

18.5.7 软碰硬

RADIOSS Block 默认计算得到的接触刚度对于大多数问题都是合适的，能够避免很高的穿透导致的时间步长下降。当接触发生在相似的材料之间时，使用默认的刚度是合适的，但是当接触的主从两侧刚度相差太大时，需要特别留意接触刚度的选取（请查阅/INTER/TYPE7 卡片的 I_{stf} 参数）。例如，钢板冲击软泡沫，如果软泡沫是主表面，默认的刚度（I_{stf}=0，接触刚度取主片的刚度）可能太小而不足以避免大的穿透。如果不想让这种情况发生，除了调整主从设置和更换接触刚度选择方式（I_{stf} 参数）外，可以先计算从节点刚度与主表面刚度的比值，如果该比值大于 100，则将接触刚度缩放因子（参数 Stfac）设为这个比值以增大接触刚度。

图 18−29 展示了钢板作为从节点与泡沫发生碰撞的情况，从节点刚度是主表面刚度的 380 倍以上，此时主表面一侧是软材料，而且默认使用 I_{stf}=0 选项，那么可以将接触刚度缩放因子 Stfac 设为 380 以避免大穿透的发生。

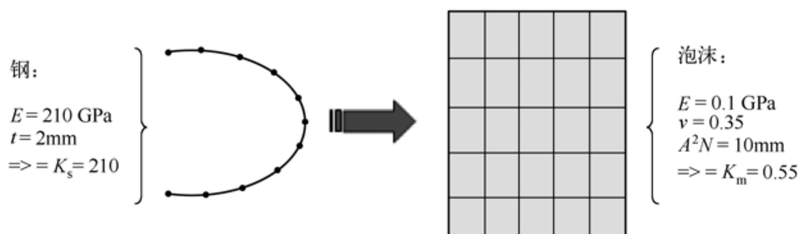


图 18−29 钢与泡沫碰撞

18.5.8 边—边接触锁死

由于 Interface Type 7 是点—面接触类型，所以它不能处理边—边接触，这种对与边—边接触处理的局限性如图 18−30 所示。

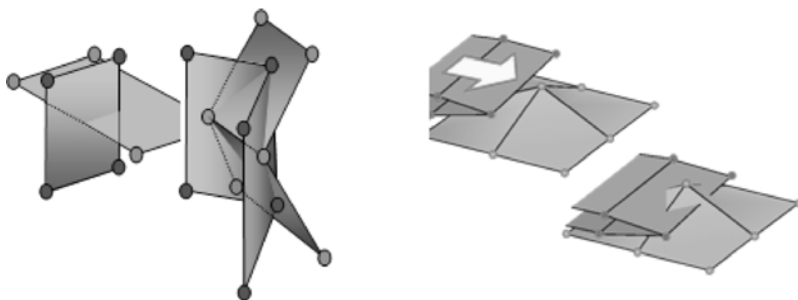


图 18−30 边—边接触

当网格很精细时，边对边的侵入通常伴随着节点对 Shell 单元的接触。边—边接触主要的问题是可能发生锁死的情况。图 18−31 示意了这种情况的发生：节点 *N* 和 Shell 单元 *S* 原本没有检测到接触，在由于边—边侵入后，它们的相关位置发生了变化，之后单元 *S* 沿法向移动时，与节点 *N* 之间将检测到接触发生，接触力将阻止单元 *S* 的滑行。通常这种情况会带来大的穿透，计算也将由于时间步长的降低而停止不前。

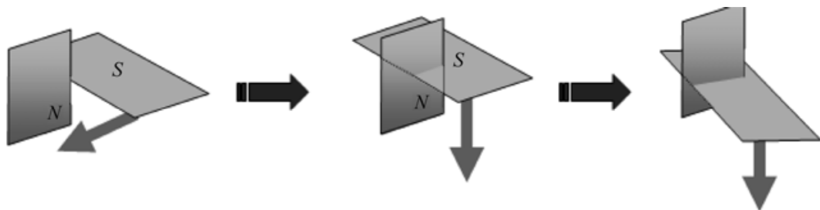


图 18−31　边—边接触锁死

如果发生了这种锁死，有必要在该局部区域定义一个边—边接触（Interface Type 11）来解决这个问题。

18.5.9 切向力

当侵入 Interface Gap 空间的从节点无摩擦滑动时，由于 Shell 单元边上重叠的圆柱面 Gap 的存在，这种滑动会产生切向力。图 18−32 示意了这种力的产生，由于重合圆柱面 Gap 的存在，接触力在 Shell 单元边的局部不再严格垂直与 Shell 的中面，于是就产生了力切向分量，即切向力。

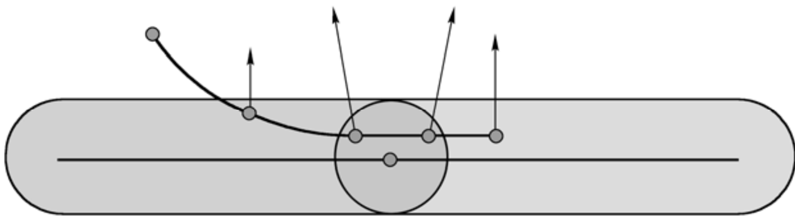


图 18−32　切向力的产生

需要说明的是，在碰撞分析中观察到这种现象是没有影响的，但是对于摩擦问题非常关键的分析，比如金属冲压成形，这种切向力的存在会影响接结果的精度。

两点提示：

（1）总是建议在后处理时查看接触力，如果接触力太大，与我们对问题物理实际的理解不符，那么需要检查模型。

（2）为了检查对称接触的力，每个 Interface 可以分解成 4 个 Interface。例如，对于两个 PART A 和 B，可以创建如下 4 个 Interface。

（1）Interface 1：A 是从，B 是主。

（2）Interface 2：A 是主，B 是从。

（3）Interface 3：A 是主，A 同时是从。

（4）Interface 4：B 是主，B 同时是从。

18.5.10 自动接触的 Gap 警告信息

WARNING ID: 94

** WARNING IN INTERFACE GAP

INPUT GAP 1.7

HOWEVER GAP IS RECOMMENDED TO BE LESS THAN 1

上面的提示信息在自接触时通常会出现。在模拟自动接触时，强烈建议使用至少是主片最小边长一半的最小 Gap（即 Gap_{min}）。这个提示信息表明主片上至少有一个单元的边长小于两倍的 Gap，从而导致局部过于刚硬的风险。

图 18-33 示意了自接触里 Gap 等于一半的单元边长的情况。当单元受压缩超过 50%后，红色的节点将进入它相邻节点的 Gap 空间内，这时它们两者之间就发生了自接触，从而导致红色节点进一步压缩变形的变形刚度等于单元本身刚度与自接触刚度之和，即此处局部产生了刚硬结构。

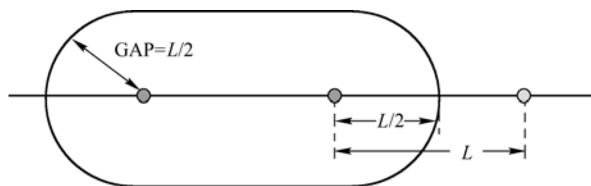


图 18-33 自动接触的 Gap

如果单元边长一开始就小于它本身的 Gap（默认为其厚度），甚至会在计算一开始就有单元的自接触。

如果这种情况只是偶尔出现或者局部少量出现，那么也是可以接受的，但是不能在自接触里频繁大量发生。用户可以通过上述提示信息在前处理软件（如 HyperCrash 或 HyperMesh）里找到发生这种情况的位置，然后按照一定的网格尺寸标准修正网格。

18.5.11 单元删除

如果模型定义了失效，并且有预期的单元删除，则如何定义这些单元和节点在 Interface 里的删除行为就很重要。当单元被删除后，它的片还存在于 Interface 的主片中，它的节点还存在于 Interface 的从节点中，这会导致巨大的错误——相当于删除的单元没有刚度。因此，如果模型有预期的失效行为，强烈建议设置 Interface 卡片 I_{del} 参数的值为 2。这个选项将会在 Interface 里实时将被删除单元的片和从节点移除。

18.6 边—边接触（Interface Type 11）

Interface Type 11 用于模拟 1D 单元、Shell 和 Solid 单元的边之间的线接触，如图 18−34 所示。

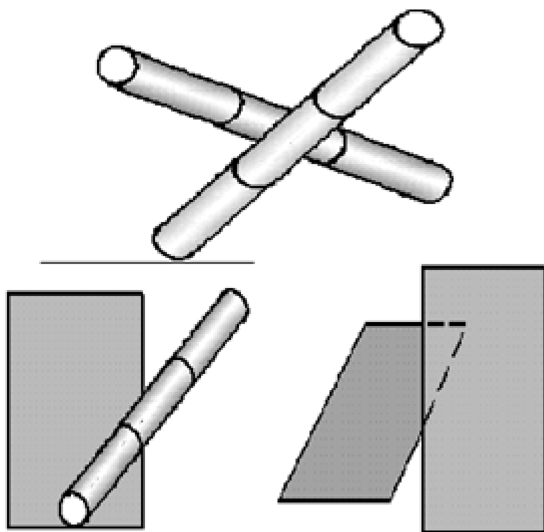


图 18−34 边—边接触

Interface Type 11 使用与 Interface Type 7 一样的罚函数法和直接接触搜索方法，它与 Interface Type 7 一起使用，可以解决后者边—边接触锁死的问题。

Interface Type 11 使用数学上更复杂的算法，因此仅建议在需要的地方使用。大量的 Interface Type 11 会较大程度地增加 CPU 时间，使计算速度下降。

18.7 本章小结

接触的设定和计算是本书的重点内容，也是实际工程仿真最为关键的技术之一。本章介绍了 RADIOSS Block 接触的基本概念 Gap 和罚函数的基本思想，在次基础上详细介绍了最常用的几类接触，如绑定接触、对称和非对称接触、刚体接触、通用接触和边—边接触。对于最常用也是最重要的通用接触 Interface Type 7，本章也进行了详尽的介绍，主要包含 Gap 的设定、非线性的接触刚度、摩擦公式、初始穿透的处理、时间步长控制等内容。

第 19 章

气囊模型



本章介绍 RADIOSS Block 里 3 种不同的气囊模型，分别是经典的均压气囊模型（Type AIRBAG）、多腔室均压气囊模型（Type COMMU）和有限体积气囊模型（Type FVMBAG）。在 RADIOSS Block 里，它们属于不同类型的监测体积（Monitored Volume）模型。

气囊领域的研究，尤其是气囊展开过程的研究涉及结构动力学、气体热动力学和流体力学等学科，是一门专业性跨度较大的学科，更详细的技术细节，请查阅 HyperWorks 帮助文档 /MONVOL 卡片相关介绍，或者咨询 Altair 中国区技术支持部(support@altair.com.cn)。

本章重点知识

19.1　监测体积（Monitored Volume）
19.2　经典均压气囊模型（AIRBAG Type）
19.3　均压多腔室流动气囊模型（Type COMMU）
19.4　有限体积法气囊模型（FVM Type FVMBAG）
19.5　参考度量与气囊折叠
19.6　实例教程——使用 HyperCrash 进行气囊折叠
19.7　实例教程——气囊展开仿真
19.8　本章小结

由于气囊（或者称做气袋）独特的缓冲性能，在工业领域应用非常广泛，如汽车轮胎、汽车安全气囊、汽车空气弹簧、船舶空气护舷、包装用气体包装袋等。从技术方法的角度，RADIOSS Block 提供了 3 种可用于气囊建模的方法。

（1）均匀压力（Uniform Pressure，UP）法：是气囊领域研究最早使用的方法，也是常用的方法。它使用封闭的监测体积定义，假定体积内部各处的压力和温度是相同的（即均匀的），气体属性、喷气口、泄气孔、喷射效应都在监测体积里定义。

（2）耦合欧拉拉格朗日（Coupled Euler Lagrange，CEL）方法：气囊浸没在空气域（欧拉域）里，气囊的织物使用 FSI 与欧拉域进行耦合，气流使用 ALE（Arbitrary Lagrange Euler）格式计算。

（3）有限体积法（Finite Volume Method，FVM）：气囊内部的气体网格由 RADIOSS 自动进行划分，并在气囊展开过程中自动重划分，气囊的定义同均匀压力法。气流使用 ALE 格式计算。

由于 CEL 方法的计算效率很低，实际工业领域很少采用这种方法，故本章不介绍该方法。同时，经典均匀压力方法的均匀压力假设在某些实际工程问题中体现出局限性，RADIOSS Block 在它的基础上开发了改进型的均压气囊模型，即均压多腔室流动气囊模型，在一定程度上弥补了均一压力假设带来的固有缺陷。而有限体积法气囊则是 RADIOSS Block 独有技术之一，由于内部气流采用的是 ALE 格式计算，气流的流动计算和喷射效应计算精度高于均匀压力法；同时不需要用于浸没气囊的欧拉域网格，气囊内部气体网格由 RADIOSS Block 自动生成，建模简单且计算效率和速度明显好于传统的 CEL 方法。

19.1　监测体积（Monitored Volume）

在 RADIOSS Block 里，监测体积（Monitored Volume）对应的卡片是/ MONVOL。一个监测体积可以使用一个或多个 Shell（3 节点或 4 节点）PART 的表面（Surface）来定义。定义使用的表面必须是封闭（RADIOSS Starter 会检查该项，如果表面没有封闭，则会输出报错信息），其法向必须指向封闭容积的外部。用户可以在引用某个 PART 来定义表面时，在该 PART 的 ID 号前面加负号来引用其法向的反方向（或者通过合适的前处理器来反转其法向），请查阅关键字/SURF/PART 了解这一技巧。

RADIOSS Block 里有 3 种不同的检测体积模型，分别如下：

（1）经典均压气囊模型（Type AIRBAG）。

（2）均压多腔室流动气囊模型（Type COMMU）。

（3）有限体积气囊模型（Type FVMBAG）。

在必须考虑气流流动过程或者需要精确建模气体发生器的喷射效应（jetting effect）的研究中，比如，汽车安全气囊对汽车离位乘员的保护，侧气囊在展开过程中与假人头部的相互作用，气囊冲破汽车仪表板过程等，经典的均匀压力法由于固有的均匀压力假设而变得不再适用，此时，建议使用有限体积法（FVM）的气囊模型（FVMBAG）。

气袋材料一般为织物材质，其 Shell 单元属性和材料模型可以使用/MAT/LAW19 和/PROP/SH_ORTH 或者/MAT/LAW58 和/PROP/SH_FABR 的其中一种。前者认为织带材料是线弹性行为，而第二种方式则认为织带是非线性弹性行为。

织物材料的行为完全是膜行为，所以推荐在料厚方向积分点设为一个。织物可以使用 3 节点 C0 单元（没有沙漏）或改进的 4 节点 BT 单元（Ishell=4），为避免沙漏，其膜沙漏系数 h_m 和面外沙漏系数 h_f 应该设为 10%。

在定义多腔室流动气囊模型时，为了得到虚拟的各腔室隔膜，并定义各腔室的气体连通面，通常会用到空属性（/PROP/VOID）和空材料（/MAT/VOID）。由空属性和空材料构成的 PART 没有结构刚度，仅用于满足体积封闭的条件。

正如在第 18 章所述，在定义气囊的自接触时，通常需要定义一个自接触（Interface Type 7）和一个边—边自接触（Interface Type 11）。如果存在初始穿透，则设定 I_{nacti}=5 或 6。

19.2　经典均压气囊模型（AIRBAG Type）

经典气囊数学模型（见图 19−1）基于均压假设：① 在任意时刻气囊内部各处的压力和温度是相同的（即均匀的）；② 内部气体是理想气体行为；③ 气体热容量系数是常数；④ 与外界无热交换（绝热过程）；⑤ 温度和气体充入量（或质量流率）是时间的函数。

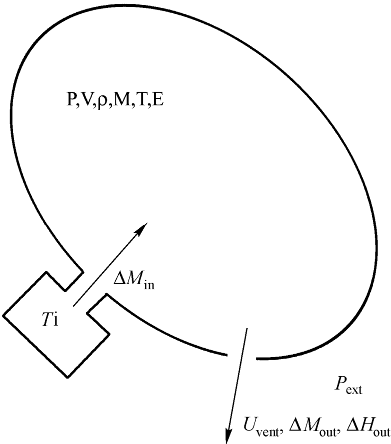


图 19−1　气囊模型

气囊的点火时间可以使用一个定义的传感器（sensor）来描述。当压力（P_{def}）或时间准则（t_{def}）条件达到时，定义的泄气孔开始起作用。

经典均压气囊的定义卡片（仅一个喷射口、一个泄气孔为例）如下：

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/MONVOL/AIRBAG/monvol_ID/unit_ID									
monvol_title									
surf_ID$_{ex}$									
Ascale$_T$		Ascale$_P$		Ascale$_S$		Ascale$_A$		Ascale$_D$	
		μ		P_{ext}		T_0		I_{equi}	I_{ttf}
γ_i		cpa$_i$		cpb$_i$		cpc$_i$			
N_{jet}									

（续）

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
/MONVOL/AIRBAG/monvol_ID/unit_ID									
monvol_title									
γ		cpa		cpb		cpc			
fct_ID$_{mas}$	I_{flow}	Fscale$_{mas}$		fct_ID$_T$	Fscale$_T$		sens_ID		
I_{jet}	node_ID$_1$	node_ID$_2$	node_ID$_3$						
fct_ID$_{Pt}$	fct_ID$_P\theta$	fct_ID$_P\delta$		Fscale$_{p1}$		Fscale$_{p2}$		Fscale$_{p3}$	
N_{vent}									
surf_ID$_v$	A_{vent}		B_{vent}		T_{stop}				
T_{vent}		ΔP_{def}		ΔtP_{def}		fct_ID$_V$	Fscale$_V$		I_{dtPdef}
fct_ID$_T$	fct_ID$_P$	fct_ID$_A$		Fscale$_T$		Fscale$_P$		Fscale$_A$	
fct_ID$_{t'}$	fct_ID$_{P'}$	fct_ID$_{A'}$		Fscale$_{t'}$		Fscale$_{P'}$		Fscale$_{A'}$	

19.2.1 数值阻尼

粘性系数 μ 可以减少数值震荡。

如果粘性系数$\mu = 1$，使用临界阻尼（Shell 质量和 Volume 刚度），粘性压力 q 为

$$q = -\frac{\mu}{A}\sqrt{PA\rho t/V}\,dV/dt,\ dV/dt < 0$$

$$q = 0,\ dV/dt > 0$$

其中，t 是气囊织物厚度，ρ 是织物密度，A 是气囊面积。

则气囊表面上的压力为 $P - P_{ext} + q$，其中，P 为内部气体压力，P_{ext} 是气囊外部环境气压。

19.2.2 初始条件

为避免初始时刻零质量或零容积导致的不平衡和不连续，设定以下零时刻的初始条件（I_{equi}=0）或者初始喷射条件（如果 I_{equi}=1）：

（1）$P_{ext} = P_{ini}$，初始压力等于外部压力 P_{ext}。

（2）$To = Tini$，初始温度等于环境温度（默认 295K）。

（3）如果初始容积小于 10-4 A3/2,，则施加一个小的初始容积 $Vini$ = 10-4 A3/2。

（4）初始质量、能量和密度从上述初始值计算得到。

零时刻的喷射质量是不需要定义的。

19.2.3 气体定义

1．初始气体

γ：初始温度下初始气体常数。

γ_i = cp/(cp+R/M)，其中 R 是与单位系统有关的通用气体常数（R=8.3144Jmole^{-1}K^{-1}），M 是初始气体的分子量。

cpa$_i$、cpb$_i$、cpc$_i$ 是下述方程中的比热系数，它确定了初始气体单位质量的恒压比容：

$c_{pi} = cpa_i + cpb_i * T + cpc_i * T^2$

2．喷射气体

N_{jet} 是监测体积的喷气口数量。

γ：初始温度下喷射气体的气体常数。

cpa, cpb, cpc：喷射气体对应的比热系数。

funct_ID$_{mass}$：喷射质量曲线。

Fscale$_{mass}$：喷射质量曲线缩放系数。

funct_ID$_T$：喷射温度曲线。

Fscale$_T$：喷射温度曲线缩放系数。

sens_ID：启动喷射的传感器 ID。

喷射气体的质量和温度时间曲线一般由以下两种途径得到：

（1）从气囊供应商处获得。

（2）进行密闭罐试验（Tank Test）。

3．喷射效应（仅对/MONVOL/AIRBAG 或/MONVOL/COMMU）

I_{jet}：如果 I_{jet} 不等于 0，喷射效应使用超压ΔP_{jet} 施加到气囊单元上，如图 19−2 所示。

$$\Delta P_{jet} = \Delta P_1(t)\Delta P_2(\theta)\Delta P_3(\delta)\max(\vec{n}\times\vec{m},0)$$

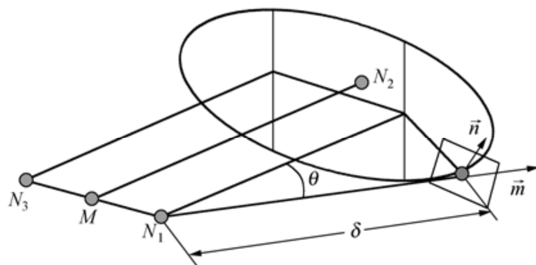


图 19−2　喷射效应

其中，N_1, N_2, N_3 用户根据喷口的几何定义的节点，$\Delta P(t)$, $\Delta P(\theta)$, $\Delta P(\delta)$ 是用户指定的经验函数 。

19.2.4 泄气孔定义

Nvent：定义使用的泄气孔的个数。

surf_ID$_v$：泄气孔表面 ID。

A_{vent}：泄气孔面积（surf_ID$_v$ =0）或缩放系数（surf_ID$_v$≠0）。

B_{vent}：等于零（surf_ID$_v$ =0）或是影响区的缩放系数（surf_ID$_v$≠0）。

T_{stop}：泄气截止时间。

T_{vent}：泄气开始时间。

ΔP_{def}：打开泄气孔的压力差，$\Delta P_{def} = P_{def} - P_{ext}$。

ΔtP_{def}：用于打开泄气孔的压力差$\Delta P > \Delta P_{def}$ 的最小持续时间。

fct_ID$_V$：流出速度曲线 ID，fct_ID$_V$=0 时为等焓流出模型，否则为 Chemkin 模型。

1．等焓流出模型

容积内的排气和泄漏认为是等焓的。流动被认为是储蓄容器通过一个有效面积为 A 的小

腔室无冲击流动。焓守恒条件下泄气孔的速度为 u，Bernouilli 方程写为

（监测体积）$\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P}{\rho}=\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_{ext}}{\rho_{vent}}+\frac{u^2}{2}$（泄气孔）。

施加绝热条件：

（监测体积）$\frac{P}{\rho^{\gamma}}=\frac{P_{ext}}{\rho_{vent}{}^{\gamma}}$（泄气孔），其中，$P$ 是气囊内的压力，ρ 是密度。

于是，出口速度满足公式：$u^2=\frac{2\gamma}{\gamma-1}\frac{P}{\rho}\left(1-\left(\frac{P_{ext}}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)$

质量流速为

$$\dot{m}_{\text{out}}=\rho_{vent}*vent_holes_surface*u=\rho\left(\frac{P_{ext}}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}}*vent_holes_surface*u$$

能量流速为

$\dot{E}_{\text{out}}=\dot{m}_{\text{out}}\frac{E}{\rho V}=\left(\frac{P_{ext}}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}}*vent_holes_surface*u\frac{E}{V}$，其中，$V$ 是气囊容积，E 是气囊内气体内能。

2．Chemkin 模型

$$\upsilon=Fsacle_V\cdot fct_ID_V\left(P-P_{ext}\right)$$

$$\dot{m}_{out}=vent_holes_surface*Fsacle_V*fct_ID_V\left(P-P_{ext}\right)*\rho$$

其中，ρ 是气囊内气体的密度。

19.2.5 泄漏

泄漏也是用等焓模型描述的，对于一个给定表面，其流出速度为

$$A_{\text{out}}=\lambda f\left(A\right)g\left(P\right)h\left(t\right)$$

其中，A 是指定表面的表面积，λ 是缩放系数，P 是气体压力，t 是时间。

易知，fct_ID_t、fct_ID_P 和 fct_ID_A 分别为泄漏—时间函数、泄漏—压力函数和泄漏—面积函数，即上式中的 $h(t)$、$g(P)$ 和 $f(A)$，而 $Fscale_t$、$Fscale_P$、$Fscale_A$ 则是相应的系数，与式中 λ 等价。

定义多孔表面在接触中的泄漏关闭也是可以的，请查阅 Interface Type 7 的 Ibag 选项。

19.2.6 其他定义形式

/MONVOL/AIRBAG1 是另一种形式的均压气囊，所有假设与经典均压气囊（/MONVOL/AIRBAG）一样，除了对气体常数的描述方法以外。

1．初始气体的描述

/MONVOL/AIRBAG 使用 γ_i 和 cpai、cpbi、cpci 定义，而/MONVOL/AIRBAG1 可以直接

使用气体物质来定义，即使用 MID 数据引用如下某种定义过的气体。

（1）/MAT/GAS/MASS：按单位质量定义气体恒压比热容。

（2）/MAT/GAS/MASS：按摩尔数定义气体恒压比热容。

（3）/MAT/GAS/PREDEF：按约定的气体名称。

2．对喷射气体的描述

/MONVOL/AIRBAG 使用γ和 cpa、cpb、cpc 定义，而/MONVOL/AIRBAG1 可以直接使用定义过的喷射属性来定义，喷射属性里包含每种气体的质量和温度曲线，每种气体的恒压比热容又可以使用上述 3 种方法中的一种来描述。

（1）/PROP/INJECT1：描述每种气体成分的喷射质量和温度曲线。

（2）/PROP/INJECT2：描述混合气体的喷射质量和温度曲线以及各组分的百分比。

19.3　均压多腔室流动气囊模型（Type COMMU）

同经典的均压气囊模型一样，均压多腔室流动气囊模型也用于模拟气囊气室，在模拟气囊展开方面，其模拟精度要高于单一类型的均压气囊。这种流动类型（或者称做连通类型）的监测体积像是带有一个能与其他监测体积进行气体交换的气囊，因此，物理上仅有一个气室的气囊可以在仿真模型里被构造为两个或者更多个流动类型的监测体积（即多腔室流动气囊），每个小的监测体积都可以有一个单独的喷气口和泄气孔。

1．案例 1—折叠的气囊

模拟一个折叠的气囊，每一个连通类型监测体积用于模拟一个折叠部分。两个折叠部分之间使用虚拟的属性进行封闭。相邻的监测体积之间使用这个虚拟属性作为气体连通面积。每个折叠部分监测体积的压力是不相同，而且在展开过程中连通面积是时变的（不断增大）。在这种建模方式下，有物理喷口的腔室将先被充气，与之相连的折叠部分将通过连通面积的压差开关，随后才有气体充入。这样，对于整个气囊其折叠的各个部分将在任意瞬时不再是完全均压，如图 19−3 所示，折叠后的气囊可以按折叠线被构造为 3 个独立的腔室，每两个相连的腔室之间通过虚拟的表面（使用空材料和空属性）进行气体交换。

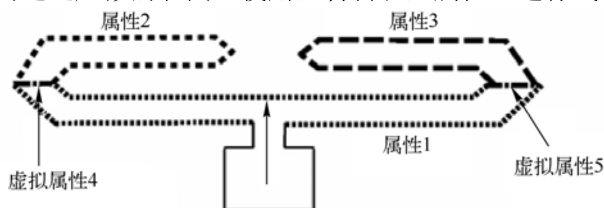


图 19−3　折叠的气囊

监测体积 1（腔室 1）由属性 1 和虚拟属性 4、5 组成，与监测体积 2 的连通面积为属性 4，与监测体积 3 的连通面积为属性 5。

监测体积 2（腔室 2）由属性 2 和虚拟属性 4 组成，与监测体积 1 的连通面积为属性 4。

监测体积 3（腔室 3）由属性 3 和虚拟属性 3 组成，与监测体积 1 的连通面积为属性 5。

2．案例 2—更一般的用法

如图 19−4 所示，监测体积 1 能够向监测体积 2 连通，同时监测体积 2 可以或者不可以从

2 连通到 1，从 1 到 2 开始流动的压差或时间可以与 2 到 1 的相应值不一样，即它们都是单向可控的。这个方式可以模拟连通阀门。

两个连通监测体积可以共用节点或 Shell 属性，但这只是可选的。

体积 1 连通体积 2，体积 2 连通体积 1 和体积 3，但是从体积 3 到体积 1 没有连通。

多腔室流动气囊类型的监测体积与经典均压气囊类型的监测体积使用相同的方程，但是流动气囊考虑了流入和流出的焓与动能。对于一个压力低于当前体积的连通体积而言，质量和能量的计算使用和排气孔一样的方程，而外压则是连通体积的压力。

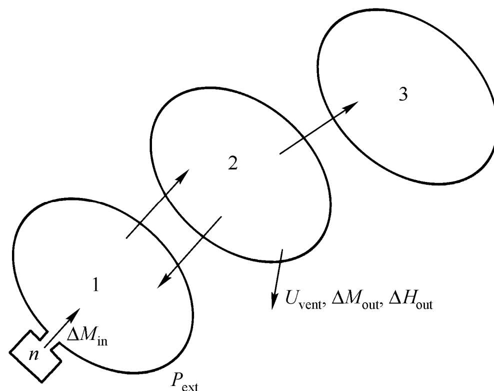


图 19-4　多腔室流动气囊模型的一般用法

$$u^2 = \frac{2\gamma}{\gamma-1}\frac{P}{\rho}\left(1-\left(\frac{P_{ext}}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)$$

其中，$P_{vent} = \mathrm{Max}\left(P_{crit}\ ,P_{neighbor}\right)$。

$$\rho_{vent} = \rho\left[\frac{P_{vent}}{P}\right]^{1/\gamma}$$

$$\Delta M_{out} = \rho_{vent}A_{vent}u_{vent}dt = \rho\left[\frac{P_{vent}}{P}\right]^{1/\gamma}A_{vent}u_{vent}dt$$

$$\Delta H_{out} + \Delta E_{Kout} = \Delta M_{out}\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P}{\rho} = \Delta M_{out}\gamma E/M$$

这些质量和能流将在下一个循环从当前体积移除，并被加到流入的连通体积中。

喷气口、泄气孔、初始条件同经典均压气囊模型（/MONVOL/AIRBAG）完全一样，但其卡片（/MONVOL/COMMU）的最后有如下数据栏：

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
bag_ID	surf_ID$_c$	ΔP_{def}		A_{com}		T_{com}		ΔtP_{def}	

该数据栏各参数解释如表 19-1 所示：

表 19-1　各参数说明

bag_ID	与当前卡片定义的气囊相连通的气囊 ID，整数
surf_ID$_c$	连通面 ID，整数
ΔP_{def}	连通面开启流动的压力差，实数
A_{com}	连通面积系数，实数
T_{com}	开始流动的时间，实数
ΔtP_{def}	用于确定连通面开启的“压力差超过ΔP_{def}的最小持续”时间，实数

需要注意以下几点：

（1）所有与当前气囊（流动气囊）连通的气囊（bag_ID）必须是流动气囊模型。

（2）连通面开启流动的条件是时间 T 大于 Tcom 或者压差ΔP_{def} 持续的时间达到ΔtP_{def}。

（3）如果当前气囊与多个流动气囊连通，则它与每个气囊的连通关系的定义都需要一行上述数据栏。有 N 个连通关系，则上述数据行需要 N 个。

（4）如果气囊 J 与 K 有连通面，则在 J 的定义中需要定义 J 到 K 的流动条件（如连通面、压差及其持续时间等）。而 K 到 J 的流动条件需要在 K 的定义里描述，如果在 K 的定义里没有 K 到 J 的流动条件，则视为 K 到 J 不能流动。这时，J 与 K 之间仅单向流动。

19.4 有限体积法气囊模型（FVM Type FVMBAG）

19.4.1 基本定义

有限体积法（FVM）是计算流体动力学（CFD）的基础理论之一。有限体积法气囊模型将气囊内气体的流动按照流体流动处理，使用有限体积积分格式，因而没有压力与温度的均匀假设。

基于理想气体和绝热过程假设，喷入质量、速度和温度都是时间的函数。喷入速度按下式计算：

$v_{\mathrm{in}}(t)=\dfrac{dm(t)/dt}{S\rho_{\mathrm{in}}(t)}$，其中，$S$ 是喷气口截面积。

同经典均与压力气囊模型一样，可以使用传感器来定义点火时间，当达到指定压力（P_{def}）或超压持续时间到达ΔtP_{def} 时打开泄气孔。

在 RADIOSS Block 里，有限体积法气囊只能是一个单腔室的气囊，其定义卡片/MONVOL/FVMBAG 包含的数据项如下：

（1）封闭的表面定义。

（2）初始气体。

（3）喷射器。

（4）泄气孔。

（5）材料泄漏。

（6）初始有限体积实体网格划分参数。

（7）有限体积实体网格属性。

（8）有限体积实体网格重划参数。

其中，第（1）～（5）项其定义与均匀压力气囊的定义完全一样，其中喷射效应由有限体积计算的气流流场自动获得，因此与均压气囊不同的是，不再需要指定喷射口方向和喷射效应经验方程。（见/MONVOL/AIRBAG 卡片的 node_ID1,node_ID2,node_ID3 及 fct_IDPt，fct_IDPθ，fct_IDPδ）。第（6）～（8）项是有限体积元的生成与控制。

19.4.2 有限体积元的产生与管理

与经典均匀压力气囊模型的定义卡片相比，除了卡片的关键字不一样之外，有限体积气囊模型的定义卡片多出了如下 8 个数据行，如表 19−2 所示，用于定义初始内部的有限体积网格划分、单元属性和后续重划分控制参数，即上述第（6）～（8）项参数。

表 19−2 有限体积、气囊模型的属性卡片

（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）	（8）	（9）	（10）
Vx_3		Vy_3		Vz_3					
Vx_1		Vy_1		Vz_1					
X_0		Y_0		Z_0					
L_1		L_2		L_3					
N_{b1}	N_{b2}	N_{b3}	grbrc_ID						
I_{gmerg}		C_{gmerg}		C_{nmerg}		P_{tole}			
q_a		q_b		H_{min}					
Ilvout	Nlayer	$Nfac_{max}$	Npp_{max}	I_{fvani}					

V_{x3}，V_{y3}，V_{Z3} 分别是 3 个方向的余弦，定义了一个向量 V_3。

V_{x1}，V_{y1}，V_{Z1} 分别是 3 个方向的余弦，定义了一个向量 V_1。

X_0，Y_0，Z_0 是一个点的全局坐标，定义了一个点 N_0。

则由原点 N_0，方向 V_1 和方向 V_3 确定了一个局部参照系。

L_1，L_2，L_3 则是在这个局部参照系里定义了一个空间 Q，V_1 方向长度为 L_1，V_2 方向（由向量 V_3 叉乘 V_1 得到）长度为 L_2，V_3 方向长度为 L_3。注意：这个初始空间 Q 需要完全将气囊的初始网格包围住。

N_{b1}，N_{b2}，N_{b3} 则是将空间 Q 在 3 个方向上划分的实体单元数目，grbric_ID 是用户指定这些 Solid 单元属于哪个 Solid 单元集合，也可以不指定。

I_{gmerg}，C_{gmerg}，C_{nmerg}，P_{tole} 分别是这些单元的合并参数。但气流有限体积元的体积在气囊展开过程中变为负值或者能量变为负值时，需要将这个体积元与周围体积元合并。这里有两种合并方法：① 全局比较再合并，当有限体积元的体积比所有体积元的平均体积的 C_{gmerg} 倍还小时，该体积元与相邻体积元合并。I_{gmerg}=1 时，平均体积取当时全局所有体积元的平均体积，I_{gmerg}=2 时，平均体积取初始时刻所有体积元的平均体积。② 相邻比较再合并，当有限体积元的体积比其所有相邻体积元的平均体积的 C_{nmerg} 倍还小时，该体积元与相邻体积元合并。

q_a 和 q_b 分别是二次和线性体积粘性，对于气囊起爆这种较强波动问题，建议 q_a=1.1，q_b=0.05。

H_{min}：当两层气袋织物贴在一起（接触）时，有限体积元不可能在它们之间流动，物理上是这样，但是数值上因为 Interface 的 Gap 存在，所以在数值上它们之间的距离不可能是 0。H_{min} 定义了气流不能穿过的最小体积元高度，用于表达在气袋织物贴的完全压和时气流不能流过的情况，因此 H_{min} 应该与气囊自动接触的 Gap 值相近。

Ilvout：气囊展开过程中内部有限体积元重划分与合并等信息输出的详细程度，Ilvout =0

是一般，=1 时详细输出。

Nlayer，Nfacmax 和 Nppmax：分别是预计气囊在 V_3 方向折叠的层数，预计的第一步自动划分有限体积元涉及的气囊单元片的最大数目，预计的多面体的最大顶点个数。在有限体积元的自动生成过程中，初始体积空间 Q 与初始气囊网格的封闭空间相交（类似于布尔交运算），得到一个包括气囊封闭网格的多面体表面，然后生成一个多面体，多面体分解为连续的四面体得到气囊初始内部的有限体积元，Nppmax 是分解前的多面体的最大顶点个数。

同时需要说明的是，Nlayer，Nfacmax，Nppmax 不需要精确值，只是对初始有限体积元的创建过程需要的内存有影响。改变这些值不会导致计算终止，增大它们会使 RADIOSS 获得更多内存，使气囊内部有限体积元的自动处理变得更快。

气囊展开流体模拟的重点在于如何管理气体流动计算产生的网格的管理。事实上，气体网格必须在一开始（气囊折叠时）到最后（气囊完全展开）都应该是正确的。

气囊内部体积的离散是通过一系列多面体（有限体积）实现的。部分多面体可以被进入用户定义的 Solid 单元，在气囊内部填充整个容积的一部分。如果内部容积的一部分没有被用户定义的 Solid 单元填充，自动网格程序将生成多面体进行填充。在气囊展开（体积变化）求解中通常会出现坏的有限体积元或负体积的体积元，这时就通过指定的规则来劈分或合并它们。

一个有限体积元包含一系列三角面，它们的顶点不需要和气囊织物网格节点对齐，因为它们之间是通过耦合计算的。气囊织袋网格通常使用 4 节点膜单元或者 3 节点膜单元。

使用有限体积法气囊模型的几点建议：

（1）仅使用两个方向（V_1，V_2）来“剖切”气囊网格，即 L_3=0 并设置 N_3=0，这样在第三方向上仅使用 1 个单元，这是比较稳定的设置。

（2）将 V_1 方向设为气囊初始网格轮廓尺寸最大的一个方向。

（3）Q 空间不宜太大，恰好完全包围初始气囊网格为佳。

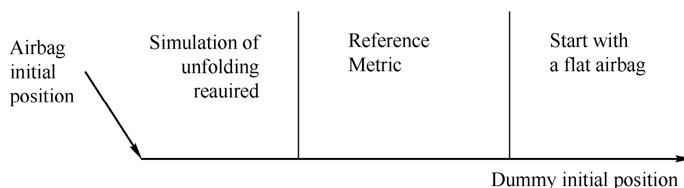
（4）将定义空间 Q 的原点尽可能放到气囊初始网格的中心位置。

（5）气囊既可以使用 4 节点膜单元，也可以使用 3 节点膜单元，但是建议使用 3 节点单元生成初始内部有限体积元时更容易。

（6）划分单元的数目（Nbi），建议按 Q 空间长度除以气囊网格平均尺寸计算。

19.5　参考度量与气囊折叠

参考度量，又称为参考网格，通常用在将气囊缩小后放到其安装容器里的情况。使用参考度量之后，气囊的初始网格尺寸将按原始尺寸（即参考网格尺寸）参与计算。使用这种建模方法的气囊可以不进行真正的展开仿真（见本章实例教程），而直接使气囊从参考度量状态（原始尺寸的展平状态）开始展开，这其中气体喷射效应也是可以考虑的。



初始状态是 RADIOSS Block 模型里仿真的状态，气囊已折叠并缩放到安装位置。参考度量是没有应变的状态，通常使用一个包含气囊参考网格各个节点坐标的文件描述，这个文件里各个节点与仿真模型气囊节点坐标是一致的，并且节点连接顺序也是一样的，其格式也是 RADIOSS Block 的标准 Starter 模型格式（按/NODE 数据行格式）。这个参考网格节点坐标文件（默认名称为 *RunName*RS0）一般使用/XREF 关键字包含进仿真模型即可，如果将其复制并粘贴进行仿真模型也是可以的。对于复杂气囊模型手工生成参考度量文件几乎是不可能的，一般都是由气囊折叠专用工具生成，如 HyperCrash 的气囊折叠工具等。

有仿真模型气囊网格节点坐标和参考网格节点坐标的差异，理论上可以求出仿真模型气囊单元的初始应变、应力和内能，但是使用参考度量技术总是只考虑弹性应变。

气囊模型的参考度量技术可以与以下单元类型、单元算法及材料模型兼容。

（1）单元类型：4 节点 Shell，3 节点 Shell。

（2）应变公式；大应变选项，小应变选项。

（3）材料模型：LAW1，LAW19，LAW58。

需要注意的是，如果使用了参开网格技术，那么织物材料 LAW19 和 LAW58 的材料方向是针对参考网格定义的。

在工业实际中气囊折叠是由专用的装夹和折叠工具完成的，而气囊展开仿真需要的只是折叠后准备工作的气囊网格模型。由于气囊仿真模型的网格尺寸不能太小，因此得到一个折叠后网格质量依然良好的气囊模型具有较高的挑战性，常见方法有如下几类：

（1）对于不太复杂的气囊，使用通用前处理器，如 HyperMesh 等直接对参考网格进行网格变形，折叠前的网格为参考网格。

（2）对于可展平气囊，可以使用 HyperCrash 的气囊折叠专用工具直接对参考几何进行折叠，然后对折叠后的几何进行网格划分，这类工具一般都能自动输出参考网格文件。

（3）进行虚拟折叠过程仿真。对参考网格定义好材料、属性及接触后，按照物理折叠情景建立虚拟刚性装夹工具，并按步骤模拟折叠过程。在折叠过程仿真结束后，气囊网格的最终状态可直接作为展开仿真的输入使用。通常这种技术都有专用的插件或小工具可以自动或半自动进行。

19.6　实例教程——使用 HyperCrash 进行气囊折叠

本教程使用 HyperCrash 对一个长方形铺平的气囊进行 Z 形折叠并划分网格。需要注意的是，HyperCrash 11.0 版本只能进行可在平面上铺平的气囊进行几何折叠。在折叠和网格划分成功后，HyerCrash 将自动保存参考网格。

本教程使用的气囊展平后长为 600mm，宽为 200mm，织物厚度为 0.3mm，折叠形状为 Z 形，如图 19−5 所示。

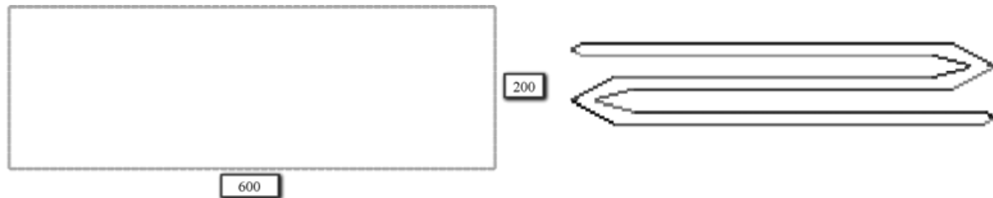


图 19−5　气囊模型

STEP 01 启动 HyperCrash 并导入气囊几何轮廓模型

（1）启动 HyperCrash。

（2）Working Dictory 选择网格模型文件 Rect_bag.nas 所在的路径，User Profile 选择 RADIOSS V10，Unit system 选择 kN mm ms kg，单击 Run。

（3）菜单 File→Import→Nastran for Crash。

（4）选择气囊轮廓模型 Rect_bag.nas，单击 OK，则图形区可见长方形。

STEP 02 张开气囊几何

（1）单击下拉菜单 Safety→Airbag Folder，进入气囊几何折叠模块工具。

（2）在弹出的 Airbag Folder 9.0 工具面板里，单击 Input Geom。

（3）在弹出的界面里，单击启动 Expand a 1D Part。

（4）如图 19-6 所示，设置 Border width 为 5，Bag thickness 为 1。

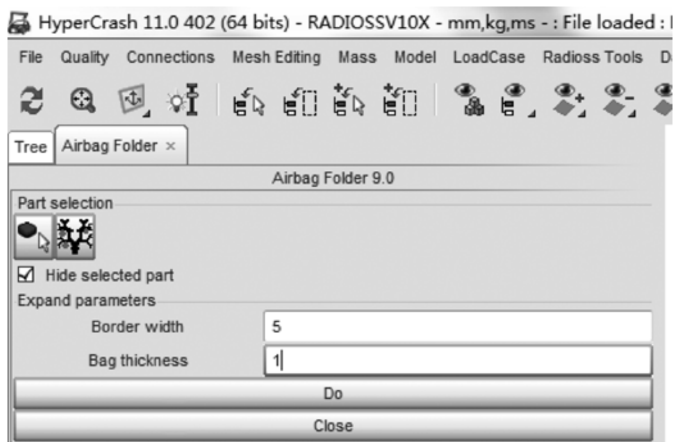


图 19-6 定义张开参数

（5）在 Part selection 栏单击按钮后，在图形区中单击矩形框。

（6）在弹出的信息框里，单击 Yes，如图 19-7 所示。

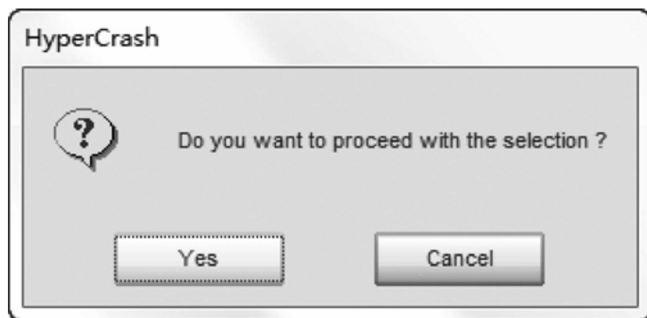


图 19-7 确认张开

（7）在图形区可见张开的轮廓，单击 Close。

STEP 03 定义参考平面

（1）在 Airbag Folder 9.0 的气囊列表里，选择 PART expanded from Model，单击 Airbag Folder。

（2）在弹出的折叠类型选择里，单击 Zig-zag，如图 19-8 所示。

（3）在弹出的折叠定义面板里，选择 improved shape 类型，单击 Airbag plan，如图 19-9 所示。

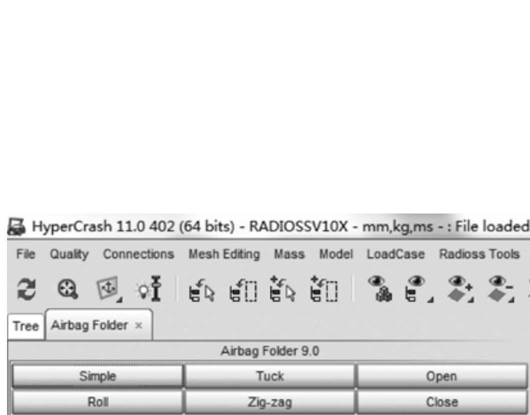


图 19-8　选择折叠类型

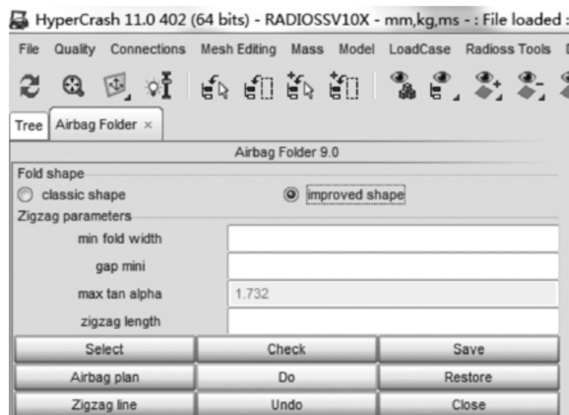


图 19-9　选择折叠形状

（4）在弹出的平面定义面板里，单击 New plan。

（5）单击选项 3 nodes 选项的节点点选工具，在图形区依次选择如图 19-10 所示的 3 个点。

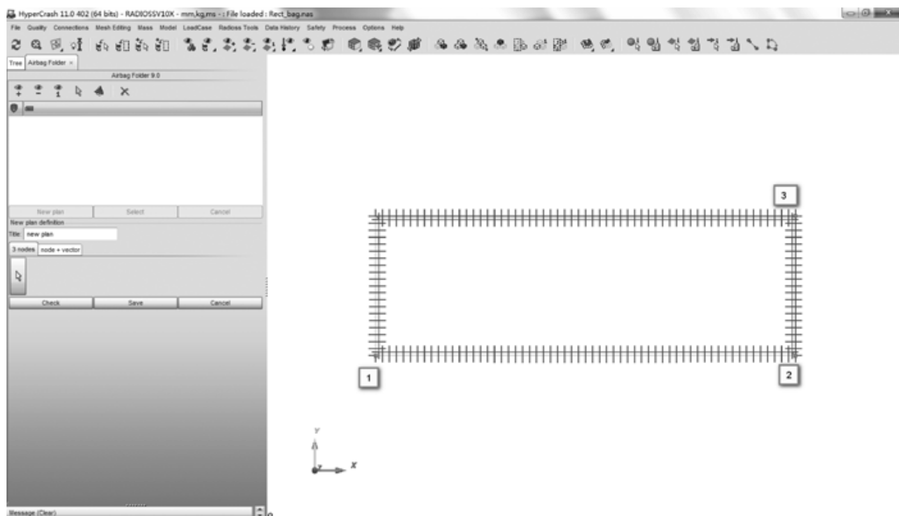


图 19-10　选择定义气囊平面的三个节点

（6）单击平面定义面板里的 Check 按钮，在图形区可见一个三点定义的平面及其法向箭头，如图 19-11 所示。

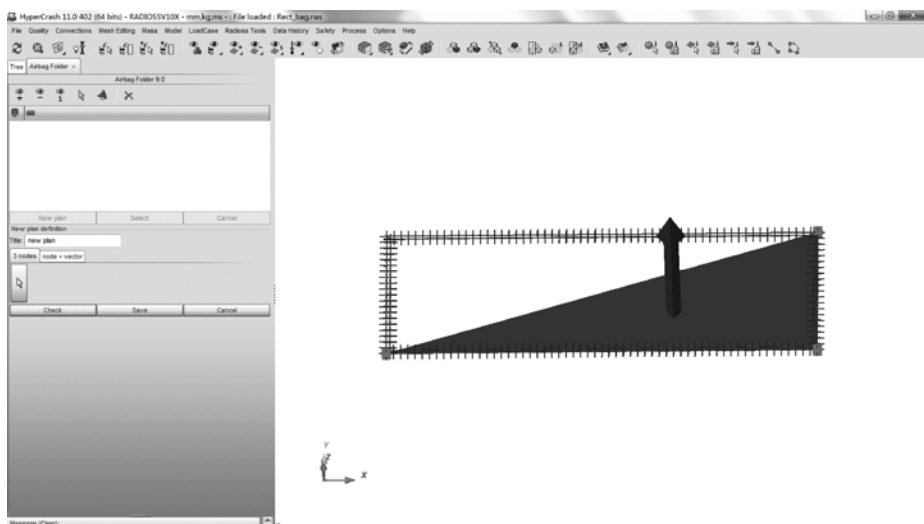


图 19-11　检查气囊平面

（7）单击 Save 按钮，在平面列表里将出现刚刚定义的气囊平面，选择这个平面，单击 Select 按钮，返回折叠定义面板。

STEP 04 定义折叠线

（1）在 Airbag Folder 面板中，单击 ZAirbag Folder 的气囊列表，选择 PART expanded from Model，单击 Airbag Folder。

（2）在弹出的折叠定义面板里，单击 Zigzag line，弹出折叠线定义面板，如图 19-12 所示。



图 19-12　定义折叠线

（3）单击 New line，在弹出的 2 nodes 定义栏里，单击节点选择图标。

（4）在图形区依次选择如图 19−13 所示的两个节点。注意：欲使该气囊三段长度一样（各长为 200mm），则此两点应距离坐下角点 *X* 方向为 200mm。

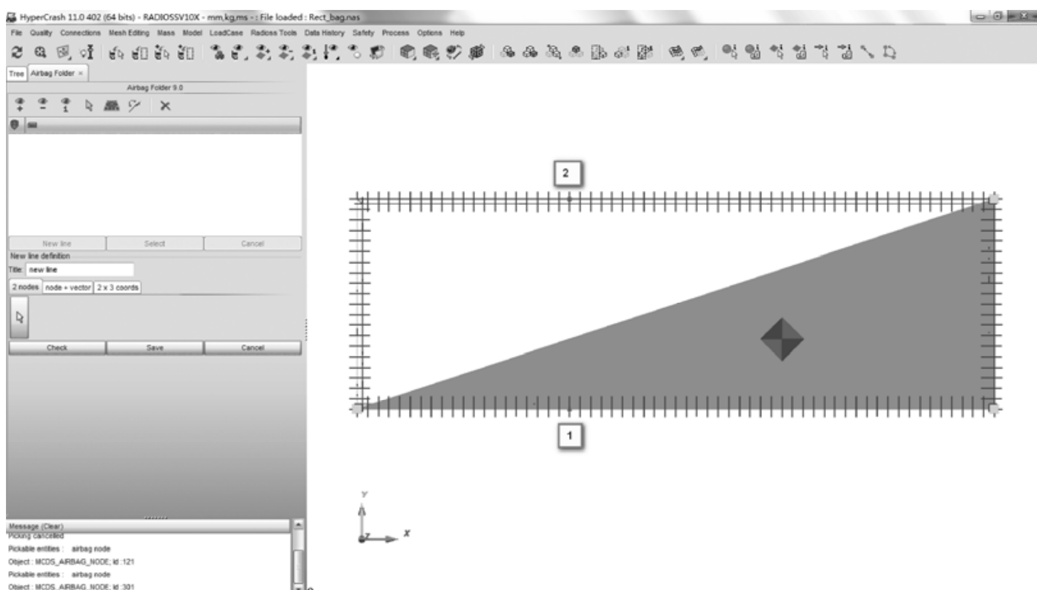


图 19−13　选择折叠线的两点

（5）单击节点点选按钮下部的 Check 按钮，在图形区预览折叠线，如图 19−14 所示。

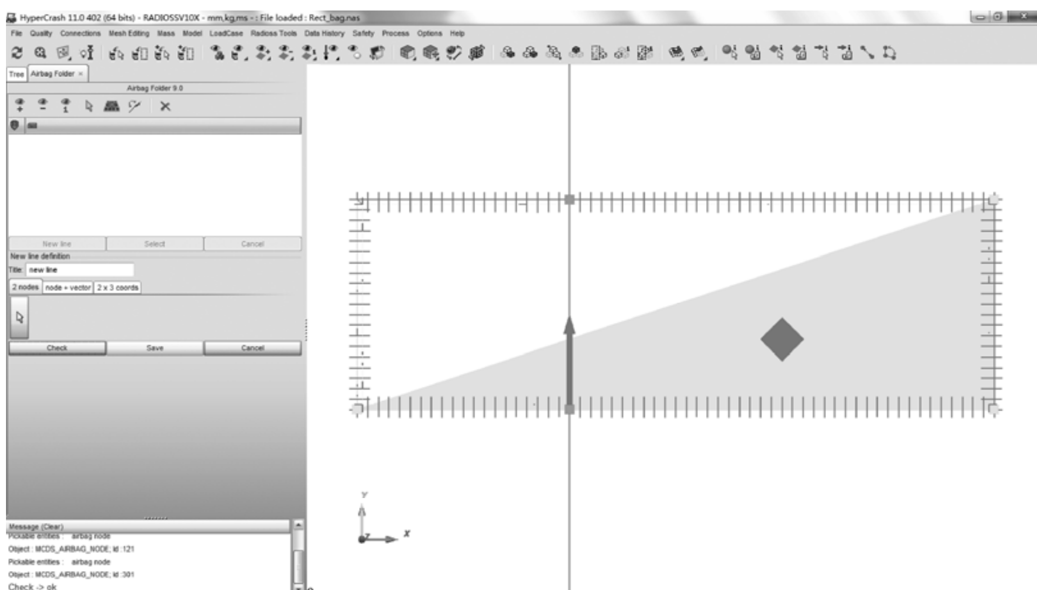


图 19−14　预览折叠线

（6）单击 Save 按钮，在折叠线列表里将出现刚刚定义的折叠线，选择这个折叠线，单击 Select 后返回折叠定义面板。

STEP 05

折叠气囊几何

（1）在折叠定义面板里，输入 min fold width 为 20，gap mini 为 2，Zigzag length 为 200，如图 19−15 所示。

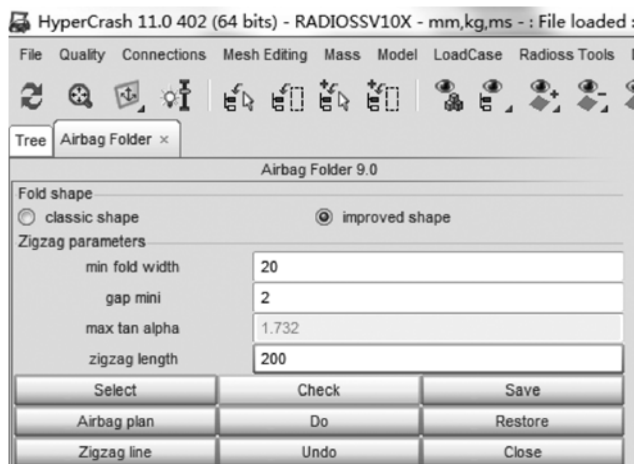


图 19−15　定义折叠参数

（2）单击折叠定义面板里的 Do 按钮，则图形区里气囊几何被折叠，按快捷键〈F11〉切换视图，并缩放图形区后，可见到折叠成功的 Z 形几何，如图 19−16 所示。

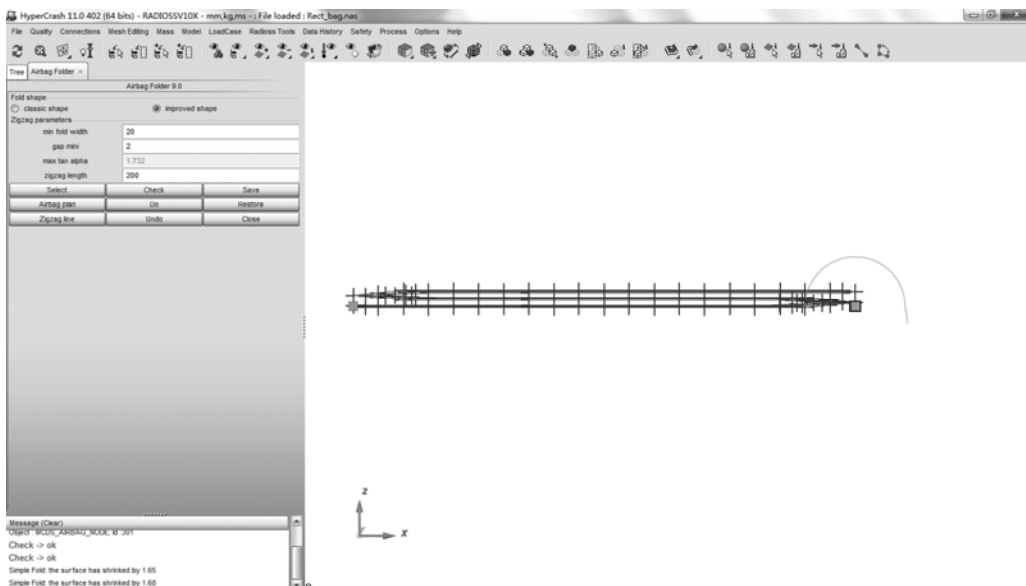


图 19−16　折叠后的气囊几何

（3）单击 Save 按钮保存折叠几何，单击 Close 返回到折叠形状定义面板，再次单击 Close 返回到 Airbag Folder 9.0 主面板。

STEP 06 对折叠后的气囊几何划分网格

（1）在 Airbag Folder 9.0 主面板的气囊列表里，选择 Simple Fold（New Shape），如图 19-17 所示。

（2）单击 Mesh 按钮，进入网格划分面板。

（3）在网格划分面板，设置如图 19-18 所示的参数。

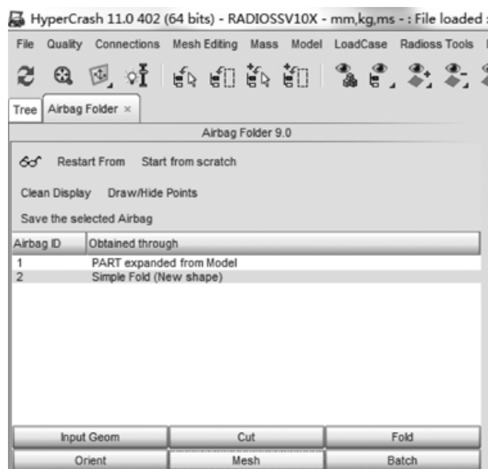


图 19-17　返回 Airbag Folder 9.0 面板

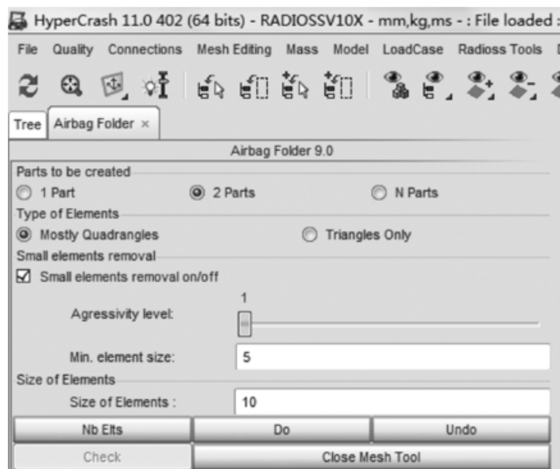


图 19-18　网格划分定义

（4）单击 Do 按钮开始划分网格，HyperCrash 弹出提示窗口如图 19-19 所示，单击 Yes。

（5）HyperCrash 再次弹出提示窗口，如图 19-20 所示，单击 Yes。

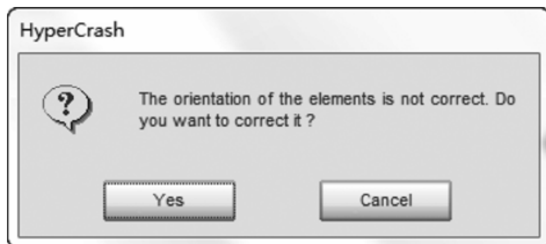


图 19-19　是否修正法向提示

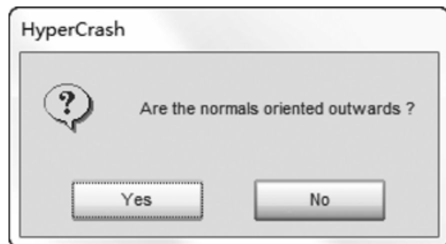


图 19-20　是否将法向设为向外提示

（6）将视图切换至网格阴影模式，则在图形区可见划分完成的气囊网格，如图 19-21 所示。

（7）在返回的 Airbag Folder 9.0 主面板里，单击左下部的 Close 按钮，退出气囊折叠模块。

STEP 07 创建并更新各个 PART 的材料

（1）在 Tree 面板里，单击模型的最高装配层级 RECT_BAG，如图 19-22 所示，将 Tree

里所有 PART 选中。

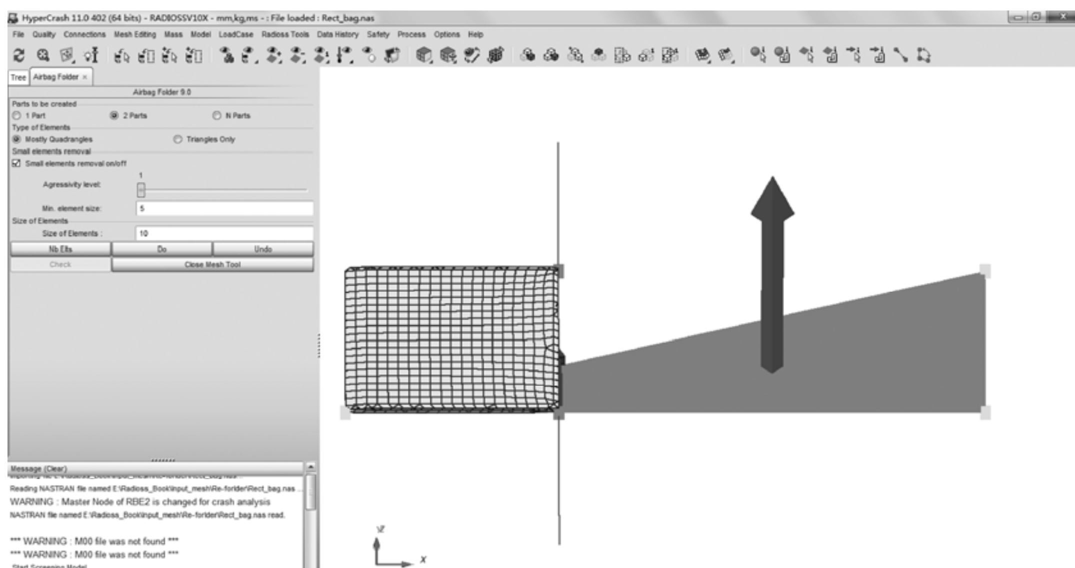


图 19–21　划分完成的网格

（2）单击菜单 Model→Material，打开 Material 面板。

（3）单击“创建”按钮，选择 Elastic→Linear elastic orthotropic（19），如图 19–23 所示。

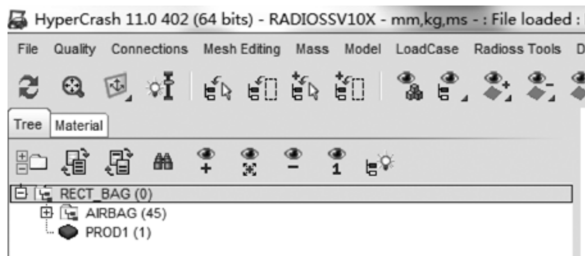


图 19–22　选中 Tree 里所有 PART

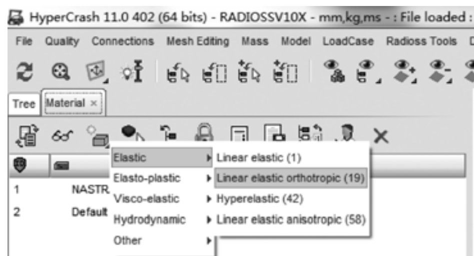


图 19–23　创建 LAW19 材料

（4）在弹出的材料参数定义面板里，输入 Title 为 Fabric，Initial density 为 8E-7，E11 和 E22 为 0.38，NU12 为 0.35，G12、G23 和 G31 为 0.14，[R_E]为 0.01，如图 19–24 所示。

（5）在材料参数定义栏下部的 Support*栏中单击按钮，则图形区所有 PART 红色高亮显示。

（6）单击左下部的 Save 按钮，完成材料定义和所有 PART 材料更新。

（7）单击 Close，退出材料面板。

STEP 08 创建并更新各个 PART 的属性

（1）单击菜单 Model→Property，打开 Property 面板。

（2）单击“创建”按钮，选择 Surface→Orthotropic shell（9），如图 19–25 所示。

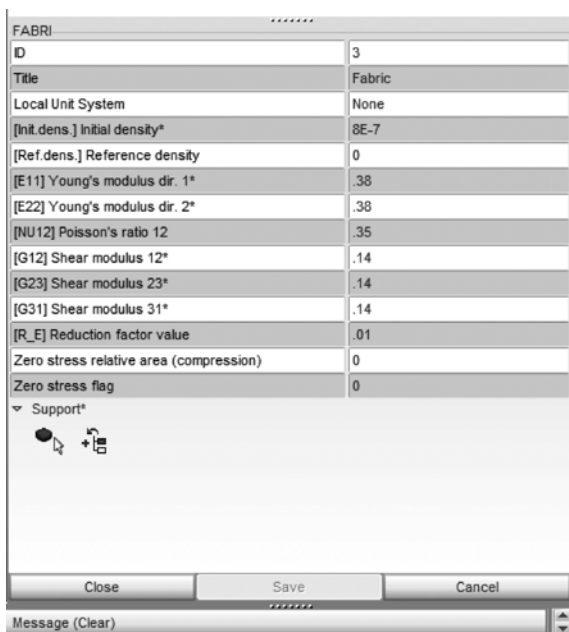


图 19-24　材料参数定义

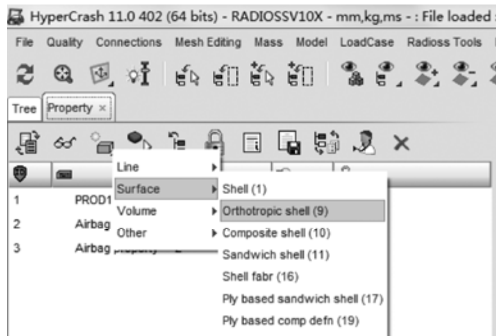


图 19-25　创建属性

（3）在属性定义面板里，输入 Title 为 Bag，[N]为 1，[Thickness]为 0.3，Reference Vector 的第二格中输入 1，其余参数保持默认值。

（4）在属性参数定义栏下部的 Support*栏中单击按钮，则图形区所有 PART 红色高亮显示。

（5）单击左下部的 Save 按钮，完成属性定义和所有 PART 属性更新。

（6）单击 Close，退出属性面板。

STEP 09 清理并导出气囊模型

（1）单击工具栏中的按钮，再单击“视图清理”按钮，图形区几何与向量箭头等标识被消隐。

（2）单击下拉菜单 Mesh Editing→Clean，进入模型清理面板。

（3）选择 All，单击 Clean。

（4）完成清理后，单击 Close 按钮，退出清理面板。

（5）单击下拉菜单 File→Export→RADIOSS，在弹出的“文件保存”对话框里，输入模型文件名 RECT_BAG，如图 19-26 所示，单击 OK 完成模型保存。

到此，本教程完成了气囊轮廓几何的张开、几何折叠、网格划分、单元法向调整、织袋材料和属性的定义。打开保存模型的文件夹可见参考度量（参考网格）文件已由 HyperCrash 自动生成，其默认名称为 *RunName*RS0，这个文件的作用请见第 19.5 节。

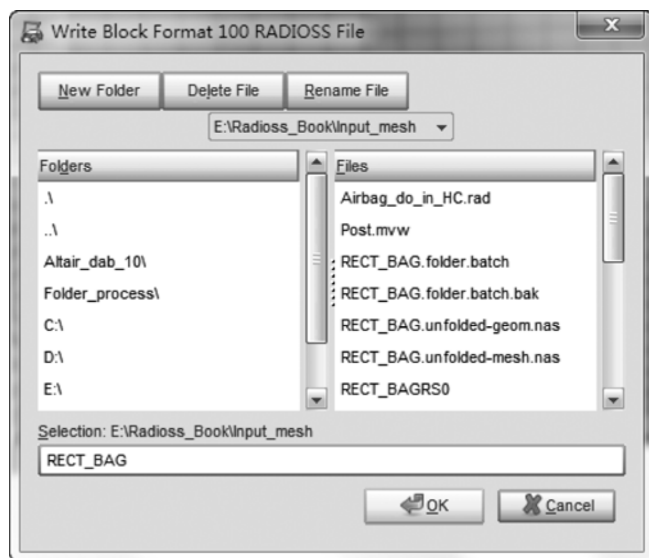


图 19-26　保存模型

19.7　实例教程——气囊展开仿真

本教程使用第 19.6 节的结果文件为原始文件，进行展开仿真。为了对比，本节教程分两部分，第一部分是使用经典均压气囊，第二部分是使用有限体积法气囊，在最后对比两种气囊模型的展开过程个动画。请读者注意两种气囊定义过程和结果动画的差异。

1. 第一部分—均压气囊

STEP 01 导入模型

（1）启动 HyperCrash。

（2）Working Dictory 选择第 19.6 节导出的模型文件 RECT_BAG_0000.rad 所在的路径，User Profile 选择 RADIOSS V10，Unit system 选择 kN mm ms kg，单击 Run。

（3）单击下拉菜单 File→Import→RADIOSS。

（4）选择气囊轮廓模型 RECT_BAG_0000.rad，单击 OK，则图形区可见 Z 形折叠的气囊。

STEP 02 定义刚性墙

（1）单击下拉菜单 LoadCase→Rigid Wall→Create，进入刚性墙定义界面。

（2）在 Select RWALL type 下拉选项里选择 Infinite Plane。

（3）在刚性墙的定义界面里输入 M0 的 Z 为−1，M1 的 Z 为 1，Distance to search slave nodes 为 10，如图 19-27 所示。



图 19-27　刚性墙的定义

（4）单击刚性墙定义界面下部的 Save 按钮，保存定义过的刚性墙。

（5）单击 Close，返回主界面。

STEP 03 定义接触

（1）单击下拉菜单 LoadCase→Contact Interface，进入 Interface 定义界面。

（2）单击“创建”按钮，选择 Multi usage（Type 7），如图 19-28 所示。

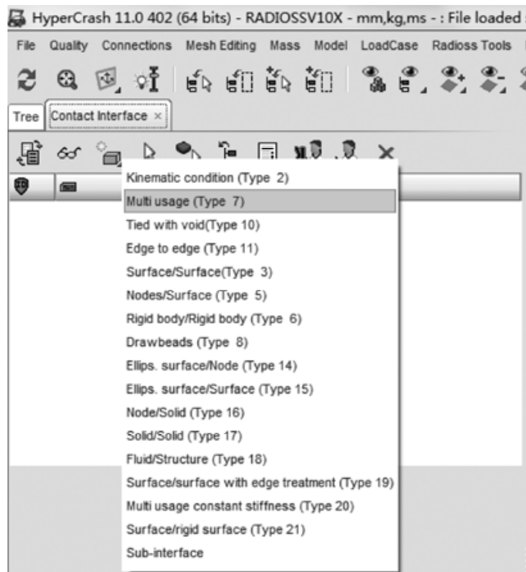


图 19-28　选择 Interface Type 7

（3）在 Interface Type 7 的定义面板里，勾选 Self Impact，输入 Title 为 New INTER 1_type7，[pMult]为 16，[GAP_MIN]为 2，[INACTI]为 5，[Iform]为 2，如图 19-29 所示。

（4）在面板下部红色的[Master_ID]选择栏里，单击按钮，在图形区按住鼠标左键，框住图形区里气囊网格，然后松开鼠标左键。

（5）单击 Save 保存创建的 Interface Type 7。

（6）在返回的 Contact Interface 面板里再次单击“创建”按钮，选择 Edge to edge（Type 11）。

（7）在 Interface Type 11 的定义面板里，勾选 Self Impact，输入 Title 为 New INTER 2_type11，[GAP_MIN]为 2，[INACTI]为 5，[Multitimp]为 48，如图 19-30 所示。

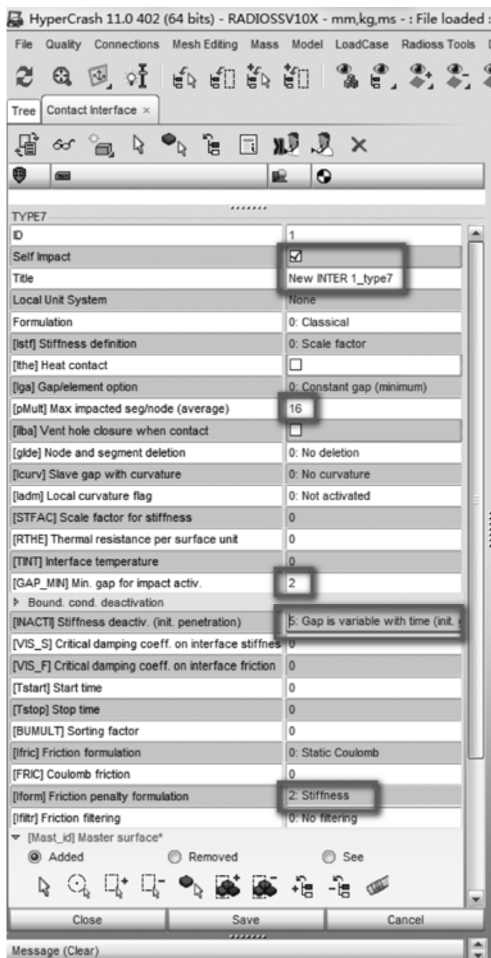


图 19-29　定义 Interface Type 7 的参数

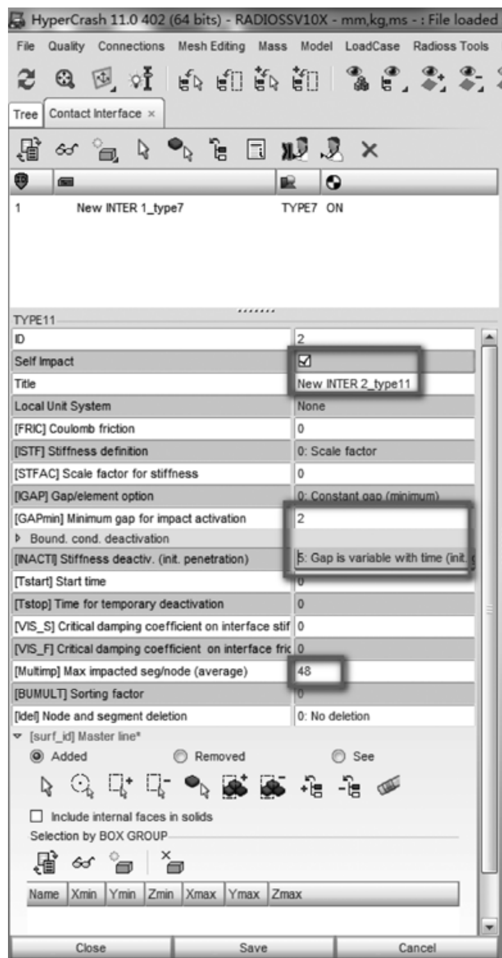


图 19-30　定义 Interface Type 11 的参数

（8）在面板下部红色的[surf_id]选择栏里，单击按钮，在图形区按住鼠标左键，框住图形区里气囊网格，然后松开鼠标左键。

（9）单击 Save 保存创建的 Interface Type11。

（10）单击 Close 关闭 Interface Contact 面板。

STEP 04 调整气囊网格法向

（1）单击下拉菜单 Mesh Editing→Part→Sheet，选择 Orientation。

（2）单击“PART 选择”按钮，单击图形区一个 PART，弹出提示框。

（3）单击提示框中的 Yes 按钮，可见到图形区该 PART 为独立显示，并有绿色法向箭头。

（4）观察到该 PART 的法向不是气囊向外的方向，单击将 PART 法向反转的按钮，完成第一个 PART 的法向反转。

（5）重复上述步骤，将另一个 PART 的法向也修正为气囊向外的方向。

（6）单击 Close 返回主界面，单击工具栏中的按钮，在图形区显示所有 PART。

（7）单击下拉菜单 File→Export→RADIOSS，在弹出的“文件保存”对话框里，输入模型文件名 RECT_BAG_base，单击 OK 完成模型保存。此模型将用于后面有限体积法气囊定义。

STEP 05 定义均压气囊

（1）单击下拉菜单 LoadCase→Monitored Volumes→Create/Modify，进入气囊定义界面。

（2）在 Monitored volume name 的 select a type 下拉菜单里选择 AIRBAG。

（3）在 Monitored Volumes 面板里定义如下：Volumetric Viscosity 为 0.1，External pressure 为 0.00010135，Gas Constant.为 1.4，cpa coeff.为 967，如图 19−31 所示。

（4）单击按钮，在图形区按住鼠标左键，框住图形区里气囊网格，然后松开鼠标左键。

（5）将 Monitored Volumes 面板切换到 Injectors 子页，输入 Gas Constant 为 1.667，cpa coeff.为 520.275，Scalefactor（mass func.）为 0.15，如图 19−32 所示。



图 19−31　均压气囊参数

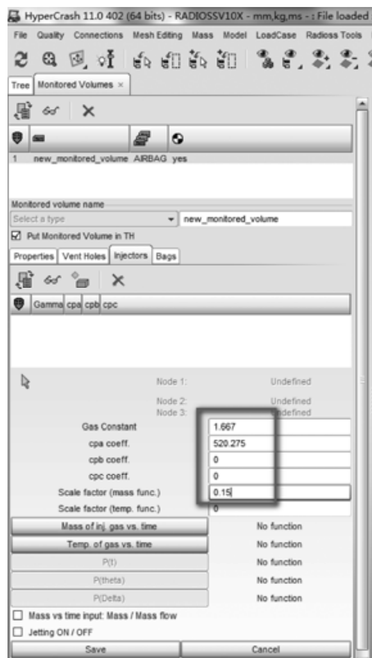
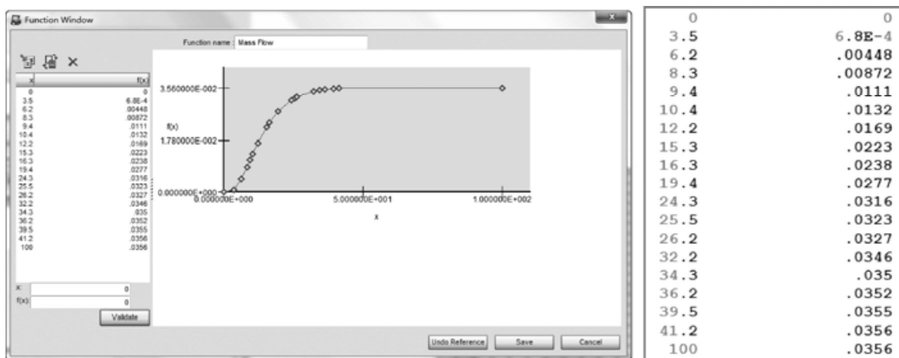


图 19−32　定义 Injector 参数

（6）单击 Massof inj. gas vs. time 按钮，弹出函数定义面板。输入 Fuction name 为 Mass Flow，在左侧数据列表里输入质量—时间曲线，如图 19−33 所示，单击函数定义面板中的 Save 按钮保存并返回。



0	0
3.5	6.8E-4
6.2	.00448
8.3	.00872
9.4	.0111
10.4	.0132
12.2	.0169
15.3	.0223
16.3	.0238
19.4	.0277
24.3	.0316
25.5	.0323
26.2	.0327
32.2	.0346
34.3	.035
36.2	.0352
39.5	.0355
41.2	.0356
100	.0356

图 19−33　定义质量—时间曲线

（7）单击 Temp. of gas vs. time 按钮，弹出函数定义面板。输入 Fuction name 为 Temperature，在数据列表里输入温度—时间曲线，（0,750），（100,750），如图 19−34 所示，单击函数定义面板中的 Save 按钮保存并返回。

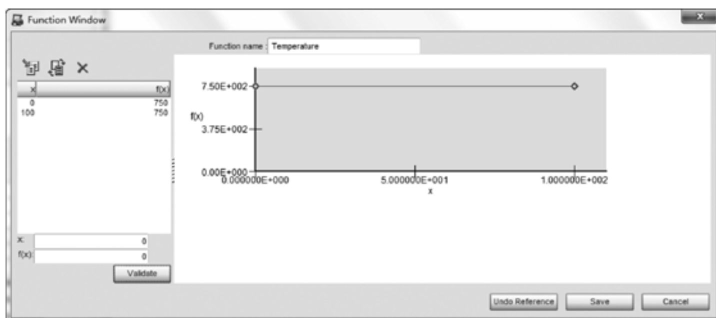


图 19−34　定义温度—时间曲线

（8）勾选 Put Monitored Volume in TH。

（9）单击 Injectors 子页下面的 Save 按钮，保存该 Injector 并返回，再次单击面板上的 Save 按钮，以保存气囊模型定义并返回 Monitored Volumes 面板。

（10）单击 Close 按钮，关闭气囊定义窗口。

STEP 06 导出模型并求解

（1）单击下拉菜单 File→Export→RADIOSS，在弹出的“文件保存”对话框里，输入模型文件名为 RECT_BAG_UP。

（2）单击 OK，单击 Save model。（按 HyperCrash 11.0 版本不同，部分版本的 HyperCrash 不会弹出 Engine file 定义窗口。）

（3）退出 HyperCrash。

（4）在保存模型的路径下，新建文本格式文件，名称为 RECT_BAG_UP_0001.rad。编

辑其内容如下：

```
/RUN/RECT_BAG_UP/1
20.01
/VERS/100
/ANIM/DT
0.0 1.
/ANIM/VECT/DISP
/ANIM/VECT/VEL
/ANIM/VECT/FINT
/ANIM/VECT/FEXT
/ANIM/VECT/CONT
/ANIM/VECT/FOPT
/ANIM/MASS
/ANIM/NODA/DMASS
/TFILE
0.5
/PRINT/-10
/RFILE
10000 0 0
/MON/ON
```

（5）回到并单击系统“开始”菜单 Start→Programs→Altair HyperWorks 11.0→RADIOSS。

（6）在 Input file，浏览并选择 RECT_BAG_UP_0000.rad，options 栏里输入-both，单击 Run 开始求解。

（7）带求解完成后，使用 HyperView 打开结果动画和时间历程曲线，查看 20ms 的气囊形状和气囊容积时间历程曲线，如图 19−35 所示。

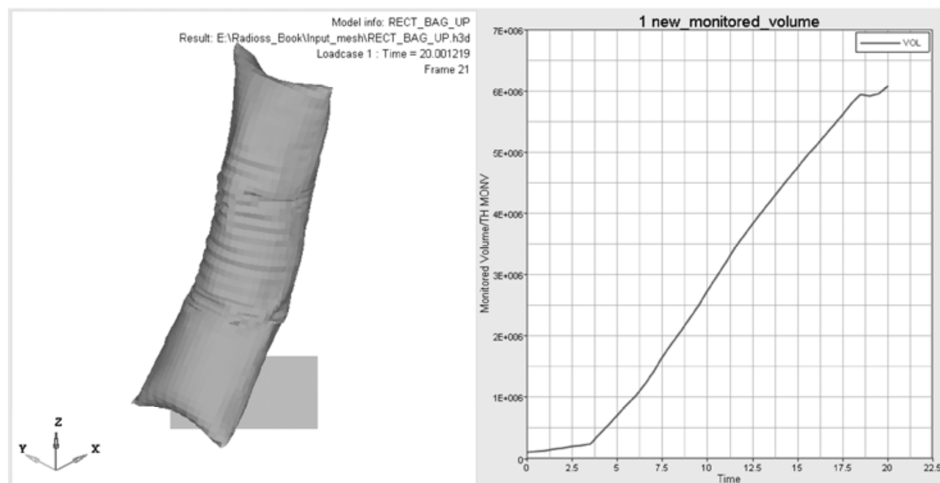


图 19−35　均压气囊 20ms 展开的形状与容积曲线

2．第二部分—有限体积气囊

从前面折叠完成的模型 RECT_BAG_0000.rad 开始，所有步骤同本节第一部分均压气囊建模完全一样，除了第 5 步。现对定义有限体积气囊的第 5 步单独描述如下：

STEP 07 定义有限体积气囊

（1）单击下拉菜单 LoadCase→Monitored Volumes→Create/Modify，进入气囊定义界面。

（2）在 Monitored volume name 的 select a type 下拉菜单里选择 FVMBAG。

（3）在 Monitored Volumes 面板里做如图 19−36 所示的设置。

（4）单击按钮，在图形区按住鼠标左键，框住图形区里气囊网格，然后松开鼠标左键。

（5）将 Monitored Volumes 面板切换到 Injectors 子页，输入 Gas Constant 为 1.667，cpa coeff.为 520.275，Scalefactor（mass func.）为 0.15，如图 19−37 所示。

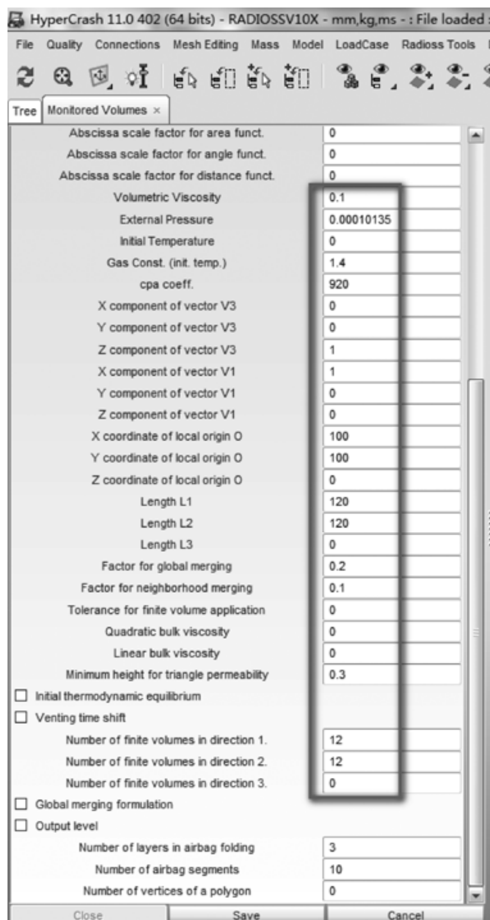


图 19−36　定义有限体积气囊参数

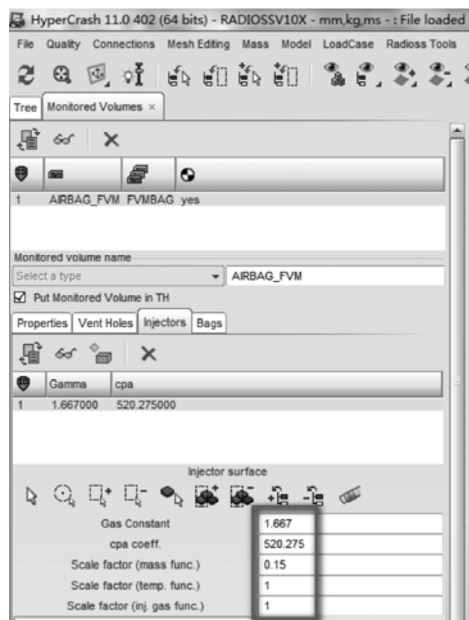
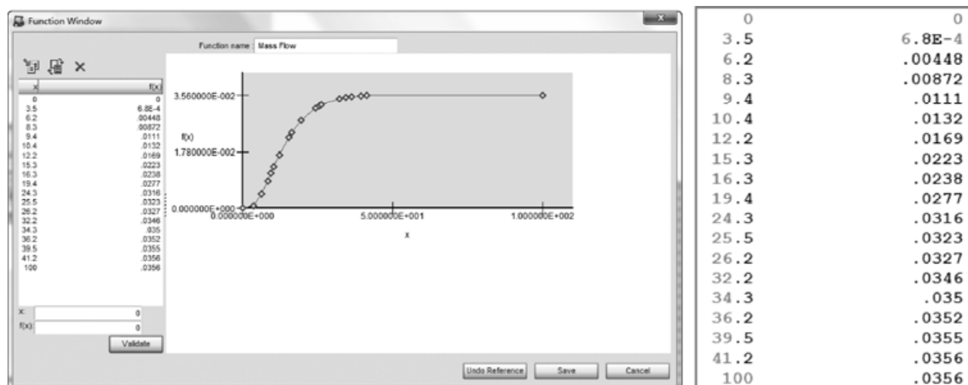


图 19−37　定义 Injector 参数

（6）单击 Massof inj. gas vs. time 按钮，弹出函数定义面板。输入 Fuction name 为 Mass Flow，在左侧数据列表里输入质量—时间曲线，如图 19−38 所示，单击函数定义面板中的 Save 按钮保存并返回。



0	0
3.5	6.8E-4
6.2	.00448
8.3	.00872
9.4	.0111
10.4	.0132
12.2	.0169
15.3	.0223
16.3	.0238
19.4	.0277
24.3	.0316
25.5	.0323
26.2	.0327
32.2	.0346
34.3	.035
36.2	.0352
39.5	.0355
41.2	.0356
100	.0356

图 19−38　定义质量—时间曲线

（7）单击 Temp. of gas vs. time 按钮，弹出函数定义面板。输入 Fuction name 为 Temperature，在数据列表里输入温度—时间曲线，（0,750），（100,750），如图 19−39 所示，单击函数定义面板中的 Save 按钮保存并返回。

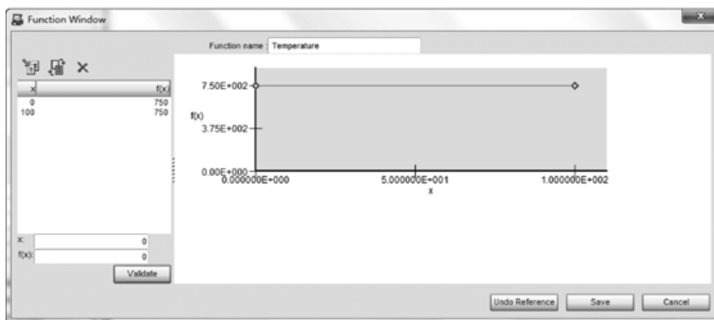


图 19−39　定义温度时间曲线

（8）单击 Injected gas velocity 按钮，弹出函数定义面板。输入 Fuction name 为 Temperature，在数据列表里输入温度—时间曲线，（0,100），（1E5,100），如图 19−40 所示，单击函数定义面板中的 Save 按钮保存并返回。

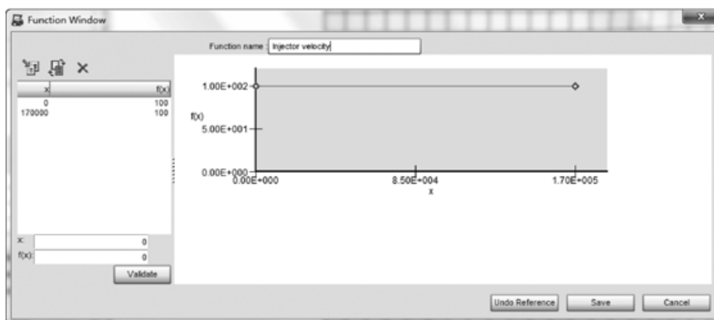


图 19−40　定义喷射速度

（9）单击“单元点选”工具，在图形区气囊最下层的中间选择 4 个单元，它们将被定义为喷口位置，如图 19−41 所示。

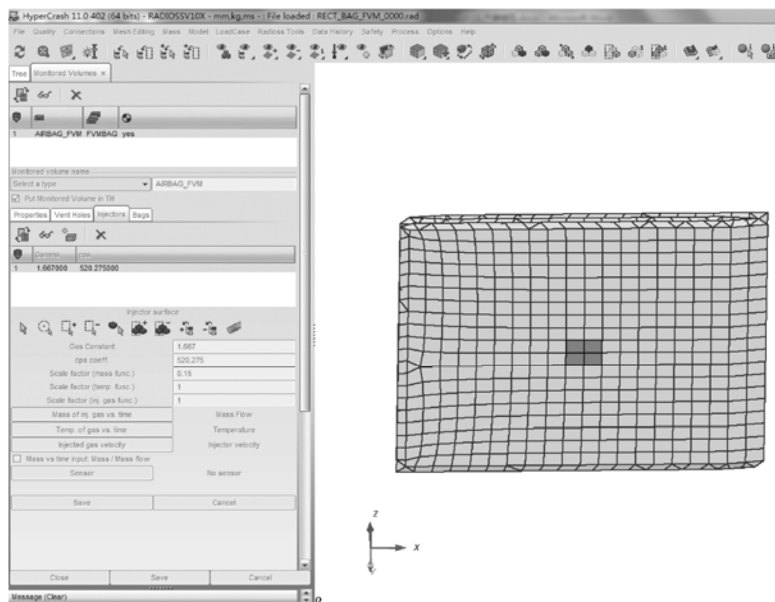


图 19-41　选择最下层单元中间 4 个单元

（10）选择完成后，按〈Enter〉键（或单击图形区右下角的 Yes 按钮）。

（11）勾选 Put Monitored Volume in TH。

（12）单击 Injectors 子页下面的 Save，保存该 Injector 并返回，再次单击面板上的 Save 按钮，以保存气囊模型定义并返回 Monitored Volumes 面板。

之后的步骤同本节第一部分的步骤完全一样，将完成的模型导出为 RECT_BAG_FVM_0000.rad，将 RECT_BAG_UP_0001.rad 文件的第一行改为/RUN/RECT_BAG_FVM/1，之后保存为 RECT_BAG_FVM_0001.rad。

将有限体积气囊提交求解，完成后与均压气囊进行对比，可见两种方法的气囊在展开过程中形状的差异，如图 19-42～图 19-44 所示。

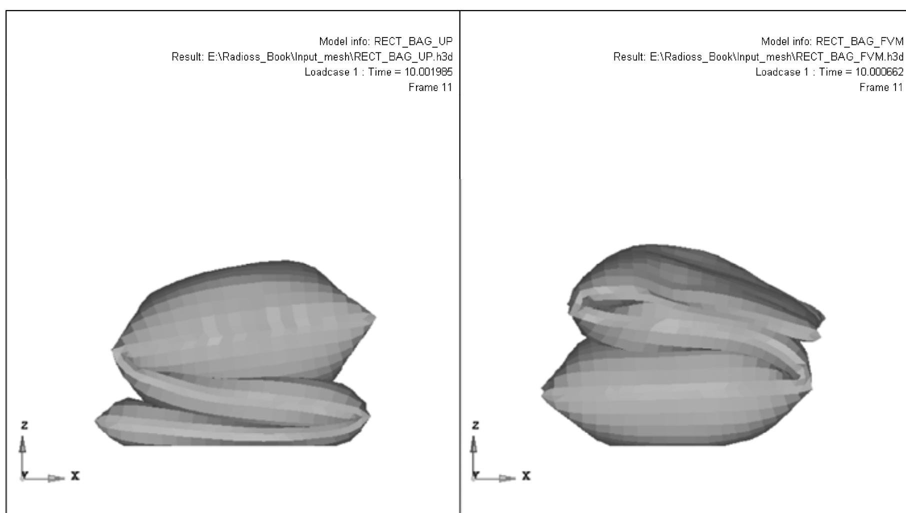


图 19-42　10ms 时刻展开的形状

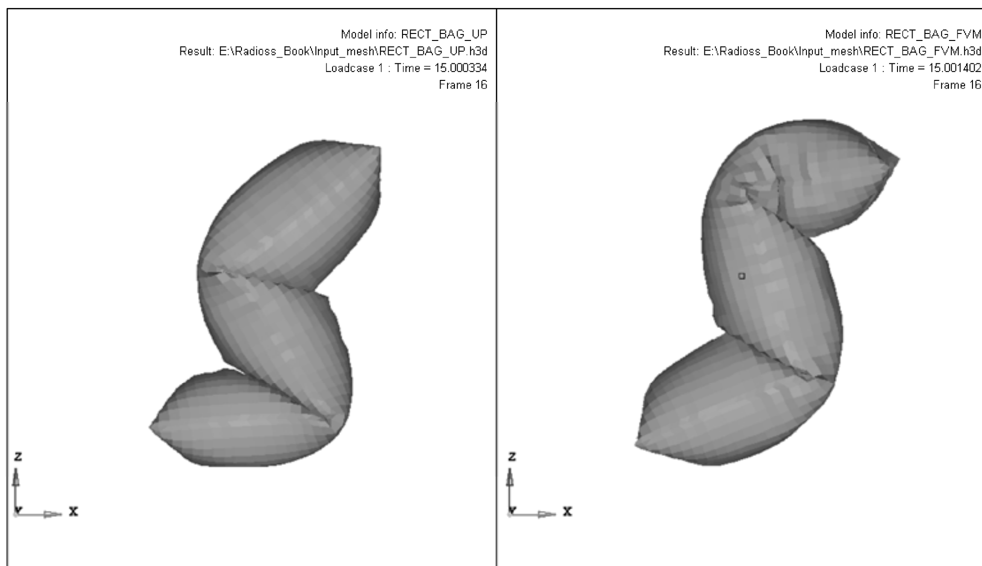


图 19-43　15ms 时刻展开的形状

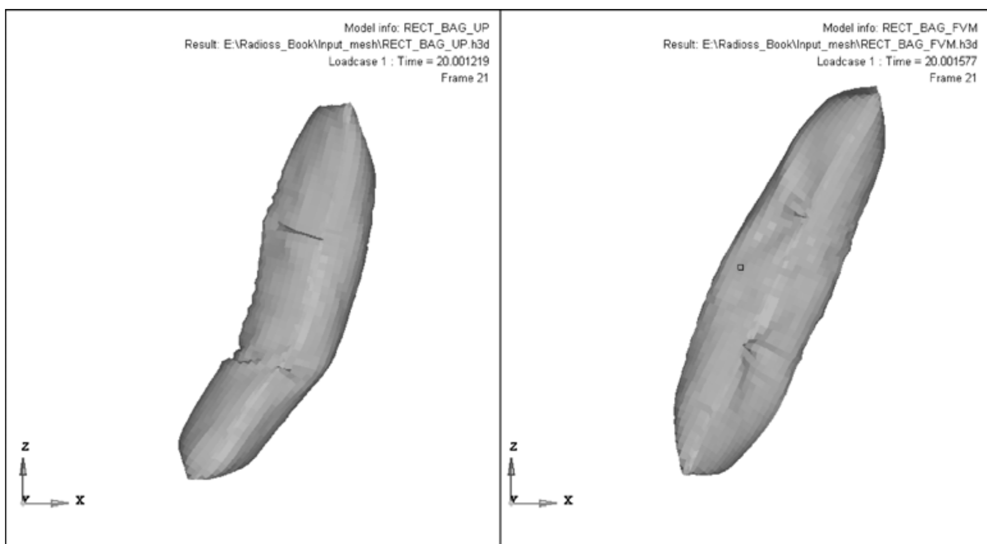


图 19-44　20ms 时刻展开的形状

19.8　本章小结

本章介绍了 RADIOSS Block 里 3 种气囊模型，经典均压气囊模型基于内部压力和温度均匀假设，一般在气流流动效应不太显著，或者气流流动过程与问题结果关联性不大的情况下使用，经验的喷射效应方程也可以包含进经典均压气囊模型里来。均压多腔室流动气囊将以个物理气室分割为多个虚拟气囊腔室，通过连通面定义各个虚拟子腔室之间的气体流通和交换，在一定程度上弥补了经典均压气囊的不足，同时多腔室流动气囊模型还能够模拟气体

流通阀门。RADIOSS Block 独有的有限体积法气囊采用有限体积格式描述气囊内部气流的流动，能够精确地模拟气囊展开这一难题，非常适用于必须考虑气流流动过程的问题。同时，对于有限体积元的初始创建和气囊展开过程的自动合并与重划分，由 RADIOSS Block 求解器自动完成，建模简单方便。

在讲解了工业实际中使用的气囊折叠技术之后，本章的实例教程使用 HyperCrash 模块示范了如何进行可展平气囊几何的折叠，并在此基础上进行了经典均压气囊模型和有限体积法气囊模型的模型创建和求解，列出了两者结果动画的比较，请读者自行练习后理解整个建模定义过程和结果的差异。

第 20 章

SPH 和 ALE 求解流固耦合问题



光滑质点流体动力学方法（以下简称为 SPH 方法）是一种求解力学方程的无网格方法，它使用成组的粒子而非传统的网格剖分方式对结构进行离散，尤其适用于模拟剧烈变形问题。在这种剧烈变形问题，有限单元方法的 ALE 和拉格朗日格式往往存在效率和精度的缺陷。

RADIOSS Block 求解器具有强大的 SPH 数值模拟功能，例如，可以对相互作用的两个对象一个使用有限单元，而另一个则使用 SPH 粒子。如果 SPH 粒子和 ALE 单元之间是通过拉格朗日单元交互作用的话，用户还可以在 ALE 模型里使用 SPH 方法。

本章重点知识

20.1　SPH 基础
20.2　ALE 基础
20.3　SPH 和 ALE 应用实例
20.4　本章小结

20.1　SPH 基础

SPH 方法是一种无网格纯拉格朗日方法，它最初由 Gingold 和 Monaghan（1977 年）和 Lucy（1977 年）用于天体物理问题中流体质团无边界三维空间任意流动问题的研究，如两星相撞、超新星爆炸以及月球形成等。经过多年的发展，它已应用在许多领域的研究，如天体物理学、弹道学、火山学、海洋学等。其理论基础来源于粒子方法，是把连续的物理量用一系列质点的集合的插值来进行数值解析，其核心是核函数，可以理解为在一定光滑长度范围内其他临近粒子对当前粒子影响程度的权函数。目前 SPH 方法只能用于 3D 分析类型。

由于是无网格算法，SPH 方法要求 SPH 粒子的初始质量和坐标满足一定条件：所有 SPH 粒子应具有相同的质量，即相同材料的粒子（具有相同的初始密度）具有相同的体积。为实现这一规则，SPH 粒子应分布在均匀的网格上（即均匀排列），其典型形式有两种：六角紧凑型和立方网格型。

六角紧凑型粒子分布如图 20−1 所示。

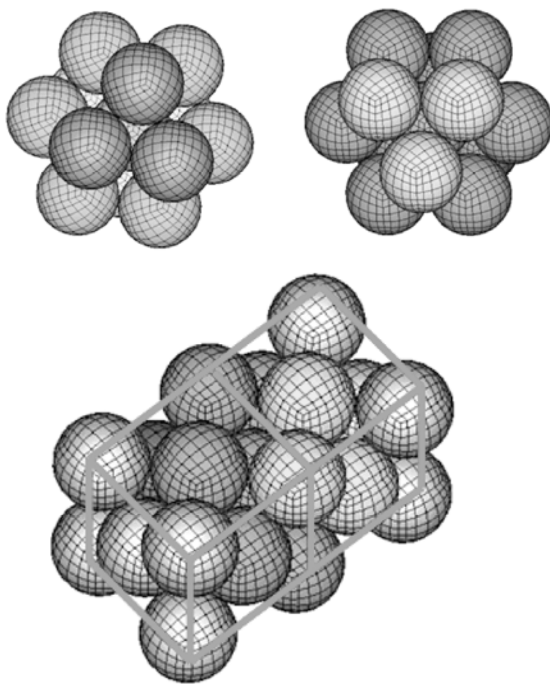


图 20−1　六角紧凑型粒子分布

其中，光滑长度 h_0 表示了六角形紧凑分布形式下任意一粒子与其距离最近的粒子的距离。每个粒子的质量 m_p 在该 PART 使用的粒子属性（/PROP/SPH）里定义，与材料密度和标称长度有关：

$$m_p \approx \frac{h_0^{\ 3}}{\sqrt{2}}\rho \tag{20−1}$$

由于整个被 SPH 粒子填充的空间可以看做是与粒子数量相等的正多面体空间，则每一个粒子在所占据的体积可以表示为：

$$V_p = \frac{h_0^{\ 3}}{\sqrt{2}} \tag{20-2}$$

核函数加权在超过距离 $2h$（h 为光顺距离）后不起作用。在六角紧凑型 SPH 粒子排布中，若其光顺距离为 h_0，则在距离 $2h_0$ 的范围内，每一粒子均有 54 个邻粒子，如表 20−1 所示。

表 20−1　六角紧凑型分布相邻粒子数与光顺距离的关系

距离 d	在距离 d 上的相邻粒子数	在范围 d 以内的相邻粒子数
h_0	12	12
	6	18
	24	42
$2h_0$	12	54
	24	78

如果启动了 SPH 校正功能，需要注意的是，即使是光顺距离 h 的轻微增加，也会导致整个 SPH 模型在拉伸行为时的数值出现不稳定现象。因此，如果在模型中采用了六角紧凑型粒子排布方式，并使用了 SPH 校正功能，那么我们建议用户将光顺距离 h 设置为小于最小的任意两个粒子之间的距离，且物理模型中无拉伸现象发生。在模型受到拉伸的作用时，光顺距离 h 的设置可以大于这个值，以限制 SPH 方法的数值不稳定现象的发生，但更大的光顺距离意味着更大的计算消耗。

对于立方网格型分布，假定在边长为 c 的立方体中有一个粒子，则粒子的质量 m_p 与材料的密度及立方体长度 c 之间有如下关系：

$$m_p = c^3 \rho \tag{20-3}$$

表 20−2 是立方网格型分布时，在距离 d 范围内的相邻粒子数。

表 20−2　立方网格型分布相邻粒子数与距离的关系

距离 d	在距离 d 上的相邻粒子数	在范围 d 以内的相邻粒子数
c	6	6
	12	18
	8	26
$2c$	6	32
	24	56
	24	80
	12	92
$3c$	6	98

为解决拉伸行为的不稳定性，根据经验，相对于六角紧凑型分布方式，立方网格型分布时需要考虑更多的相邻粒子数，光滑长度在 $1.25c$～$1.5c$ 是比较好的设置。如果将光滑长度 h

取为 1.5c，则每个粒子在 2h 距离内将有 98 个相邻粒子，而对于六角紧凑型分布，在 2h 距离内只有 54 个相邻粒子（见表 20–1）。

在实际使用 SPH 建模时，除 SPH 粒子必须均匀分布外，需要特别注意的是，所建立模型代表的实际尺寸，如图 20–2 所示。

HyperMesh 对于 SPH 离散的设置：

- 立方网格型，以 8 为小组布置 SPH 粒子，每个粒子位于一个立方体的角点。
- 六角紧凑型，以 14 为小组布置 SPH 粒子，生成在立方体的 8 个角点和六面的中心。这类似于六方密排晶格结构，并被推荐应用到 RADIOSS 模型中。

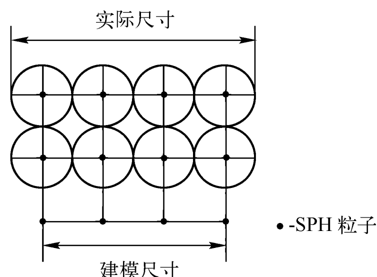


图 20–2　SPH 建立模型代表的实际尺寸

这也决定了 SPH 粒子之间的距离，因此较小的值将导致更多的单元在同一空间，但这不会影响表现粒子实质的质量或密度。

在定义 SPH 粒子与结构网格的相互作用时，比如 Interface Type 2 和 Type 7 时，SPH 粒子必须作为 slave 一侧，而分属不同 PART 的 SPH 粒子之间则不需要定义任何接触设置。

20.2　ALE 基础

拉格朗日格式有限元方法存在的固有缺点，即在材料发生剧烈变形时，网格将会畸变，而另一种经典欧拉格式虽然能够避免网格畸变问题，但不能对材料的边界进行精确跟踪，且难以处理对流效应。针对拉格朗日格式和欧拉格式各自的不足，Noh 和 Hirt 在研究有限差分法时提出了 ALE 描述法，后来又被 Hughes、Liu 和 Belytschko 等人引入到有限元法中来。其基本思想是：计算网格不再固定，也不依附于流体质点，而是可以相对于坐标系作任意运动。由于这种描述既包含拉格朗日观点，可应用于带自由液面的流动，也保留了欧拉观点，克服了纯拉格朗日方法常见的网格畸变的不如意之处。自 20 世纪 80 年代中期以来，ALE 描述已被广泛用来研究带自由液面的流体晃动问题、固体材料的大变形问题、流固耦合问题等。

通过任意拉格朗日—欧拉法（ALE）和计算流体动力学（CFD）仿真，下列问题可被模拟：

- 瞬态分析。
- 层流与湍流（k-θ 模型，LES Smagorinsky）。
- 压缩和不可压缩流动。
- 热传导。
- 流固耦合。
- 多材料。

常用的应用场合有以下几种：

- 经典流体分析。
  - 内部流动。

  - 空气动力学。
- 自由面。
  - 带有障碍的明渠。
  - 高速工具。
- 流固耦合。
  - 真空管。
  - 预测排气噪声源。
  - 激光焊接。
  - 核事故。
  - 防御设备。

本章将指导如何设置 RADIOSS 的选项。

公式的选择

运动学描述连续体的变形和网格计算域之间的关系确定，在连续介质力学的研究通常使用两种经典运动来描述：

- 欧拉法。
- 拉格朗日法。

ALE 算法是结合上面的经典运动学的优势之后开发的，同时尽可能地最小化其缺点。

1．欧拉公式

欧拉公式是经典的流体力学法。其网格固定，材料在内部流动。对于拉格朗日公式进行修改以考虑对流项。

用户可以通过指定下列卡片里的选项来施加到所需的部件上：

/EULER/MAT/mat_ID

此处，mat_ID 即是指定哪个材料被设置欧拉公式。

处理移动边界和接触时难以应用欧拉单元。

2．拉格朗日公式

拉格朗日公式是经典的结构力学法。网格绑定在材料各点上，跟随材料变形，在材料和网格之间没有滑移。载荷和边界条件可以方便地应用到材料点（nodes）上。

拉格朗日公式允许自由面的跟踪以及不同材料之间的接触。然而当结构严重变形时，拉格朗日单元由于与材料同样变形将可能发生畸变失真。因此，这些算例的准确性和鲁棒性都严重恶化。

如果一个材料没有定义为欧拉法或 ALE 法，那默认的公式为拉格朗日法。

3．ALE 公式

ALE 就是任意拉格朗日欧拉公式，即材料流经任意移动的网格，网格不依附于质点，看上去就像合并的拉格朗日和欧拉公式。

用户可以通过指定下列卡片里的选项来施加到所需的部件上：

/ALE/MAT/mat_ID

此处，mat_ID 即是指定哪个材料被设置 ALE 公式。

网格的速度和位移是任意的，如图 20−3 所示。

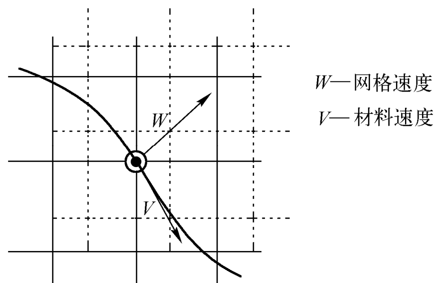


图 20−3　网格的速度和材料速度

实际上，内置的算法根据 ALE 域边界的位移决定平滑网格的变形。有几个算法是可用的（DONEA, SPRINGS, DISP, ZERO）。

有一点值得注意，ALE 公式可以在拉格朗日（$w=u$，即网格速度等于材料速度）或欧拉（$w=0$，即网格速度设为 0）时退化。

ALE 和拉格朗日材料之间的边界节点必须设为拉格朗日：网格和材料的速度相等。ALE 和欧拉材料之间的边界节点必须设置它们的网格速度为 0，如图 20−4 所示。

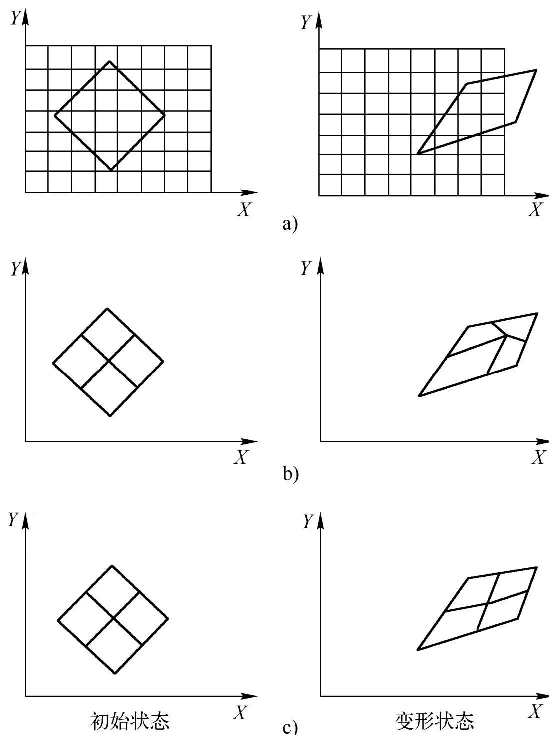


图 20−4　欧拉、拉格朗日、ALE 网格

a) 欧拉网格　b) 拉格朗日网格　c) ALE 网格

两种情况都是设置使用/ALE/BCS 选项：我们可以对 ALE 节点指定扩展边界条件（网格速度分量可以设置为 0 或材料的速度）。网格速度可以类似经典动力学的方式强制与 ALE 节点连接（option /VEL/ALE in Engine）。

Note：当一个体单元被连接到壳单元，被连接的节点自动设为拉格朗日。

1．节点边界条件

默认情况下，动力约束作用于材料的速度和加速度。在 RADIOSS 中，用户可以定义一个多种这样的约束。对于多物理场和流体的应用场合，有用的选项如下：

- 固定和全滑动的边界条件。
- 强制速度（例如，在进气口强制流量）。
- 刚性连接（再重启动阶段临时添加）。
- 缸体模拟刚性结构和连接并计算阻力和抬升里（刚体中的流动脉冲是被存储的时间历程数据）。

网格约束仅激活于网格的速度，我们可以指定以下内容：

- 固定和全滑动的网格条件。
- 拉格朗日条件，网格和材料速度同样设置。
- ALE 连接来维持节点的规则分布。
- 强制网格速度（例如，移动的进气口和出气口）。

2．基本边界条件

边界元素允许结论在域边界的单元的值，它们可以通过指定 LAW11（或 LAW18 在纯热的材料工况）来设置边界单元（2D 的四边形单元和 3D 的体单元）或 EBCS 对边界面临的元素。对于每一个变量 *P*，*rho*，*T*，*k*，*epsilon*，内能，下列需要被指定：

- 根据用户函数实施不同条件。
- 连续性。
- 平滑变化的预定义函数静默边界（LAW11，option 3）确保自由场阻抗压力和速度场。

与 RADIOSS 上述选项的 ALE/CFD 任意组合都可以被指定，可在副本，多种对流和扩散方程的关闭必须由你仔细验证。

通常如下的基本边界条件被使用。

（1）进口：流量施加使用速度、密度、能量、湍流动能（即 *k*）强加为常量。连续性是出于压力（只显示目的）和 epsilon。湍流动能，rho，*k* 外部流设为 0，内部流设为 1.5*rho*（0.06Vin）^{2}。

（2）出口：除了压力的所有变量都强制连续性，当使用静默边界选项，可以提供一个大于波长的最大影响的声速和一个典型的松弛长度。

如果单元不在边界上，需要满足连续性条件，同时需要运动学条件来禁止通量，否则对流方程不是封闭的，程序会发散。

3．流体/固体的连接

当流体接触壳单元时应至少有一排的 ALE 单元被使用。.

流固耦合的网格实例如图 20−5 所示。

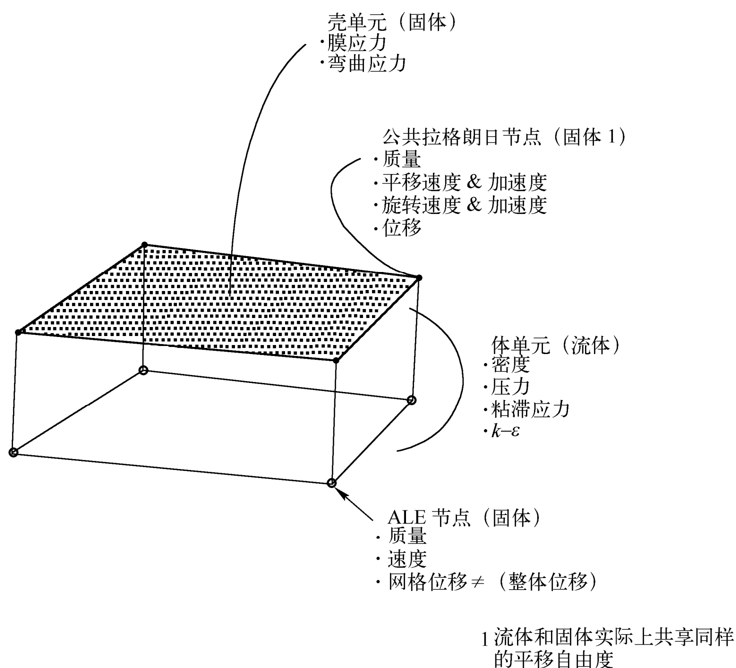


图 20–5　流固耦合的网格实例

20.3　SPH 和 ALE 应用实例

20.3.1　实例教程——应用 SPH 方法进行机翼鸟撞分析

模型描述：一只 4lb（1lb=0.453 592 37kg）的鸟以 100m/s 的速度撞向机翼的侧面，使用的分析单位是长度（mm）、时间（ms）、重量（kg），如图 20–6 所示。

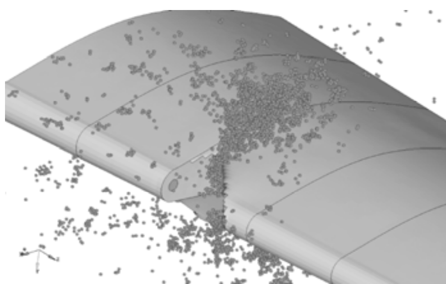


图 20–6　机翼鸟撞分析

除 SPH 应用方法外，本教程示范了航空领域典型的鸟撞分析的全过程。另外，本教程示范的多层复合材料的定义和使用方法，也值得读者学习。

STEP 01　加载 RADIOSS（Block）用户配置文件

（1）启动 HyperMesh。

（2）从 Preferences 面板中选择 User Profiles 或者单击工具栏中的按钮。

（3）选择 RADIOSS（Block110），单击 OK。

STEP 02 导入模型文件

（1）单击工具栏中的按钮，选择 bird_strike_wing.hm 文件。

（2）单击 Open。

STEP 03 创建鸟体的材料

（1）单击工具栏中的按钮，选中 create 面板。

（2）在 mat name=中输入材料名为 fliud_bird。

（3）选择 type 类型为 HYDRODYNAMIC，选择 Card image 类型为 MLAW6。

（4）单击 create/edit，在卡片中输入以下参数：

Rho_initial= 9.822e-7

C1=2.24

Pmin=-1E-4

（5）单击 return 退出。

STEP 04 创建蒙皮材料的应力—应变曲线

（1）单击下拉菜单 XYPlo→Curve editor，弹出曲线编辑器。

（2）单击 New，在 Name 中输入新建曲线名为 6061T6，单击 proceed。

（3）在 Curve List，选中 6061T6，在数值输入框中输入如图 20-7 所示的参数。

X	Y
0.0	241.067
0.005246	248.5979
0.010465	252.232
0.015656	255.5477
0.020821	258.8396
0.025959	262.0785
0.031071	265.2405
0.036157	268.267
0.041217	271.1546
0.046252	273.8873
0.051261	276.4037
0.056246	278.5652
10.0	279.0

图 20-7　需输入的参数

（4）选中 Display，单击 Update 更新曲线。

（5）单击 Close 关闭曲线编辑器。

STEP 05 创建蒙皮材料

（1）在 mat name=中输入材料名为 Aluminum_6061T6。

（2）选择 Type 类型为 ELASTIC-PLASTIC，选择 Card image 类型为 M36_PLAS_TAB。

（3）单击 create/edit，在卡片中输入以下参数：

Rho_initial= 2.8e-6

E=68.26

Nu=0.33

Eps_t1=0.08

Eps_t2=0.12

Epsilon_F=0.13

N_func=1

I_func=1（选择步骤 4 中创建的曲线 6061T6）

alpha1=0.001

（4）单击 return 退出。

STEP 06 创建肋板材料 1（肋板由两种材料组成）

（1）在 mat name=中输入材料名为 Composite。

（2）选择 type 类型为 ELASTIC-PLASTIC，选择 Card image 类型 M25_COMPSH。

（3）单击 create/edit，在卡片中输入以下参数：

Rho_initial= 1.6e-6

E11=80

E22=7.5

Nu_12=0.28

G12=G23=G13=5

Sig1_yt=Sig2_yt=Sig1_yc=Sig2_yc=Sig12_yc=Sig12_yt=1e+30

（4）单击 return 退出。

STEP 07 创建肋板材料 2

（1）在 mat name=中输入材料名为 Resin。

（2）选择 type 类型为 ELASTIC-PLASTIC，选择 Card image 类型为 M25_COMPSH。

（3）单击 create/edit，在卡片中输入以下参数：

Rho_initial= 1.35e-6

E11=E22=3.8

Nu_12=0.36

G12=G23=G13=1.397

Sig1_yt=Sig2_yt=Sig1_yc=Sig2_yc=Sig12_yc=Sig12_yt=1e+30

（4）单击 return 退出。

STEP 08 创建鸟体属性

（1）单击工具栏中的按钮，选中 create 面板。

（2）在 prop name=中输入鸟体属性名字为 SPH_Bird。

（3）选择 type 类型为 other，选择 Card image 类型为 SPH_PROP。

（4）单击 create/edit，在卡片中输入以下参数：

Mp=1.725149e-4

Qa=2e-30

Qb=1e-30

H=6.286

（5）单击 return 退出。

STEP 09 创建蒙皮属性

（1）在 prop name=中输入蒙皮属性名字为 Skin_shell。

（2）选择 type 类型为 SURFACE，选择 card image 类型为 P1_SHELL。

（3）单击 create/edit，在卡片中输入以下参数：

Ishell=24

N=5

Thick=2

Ithick=1

Iplas=1

（4）单击 return 退出。

STEP 10 创建蒙皮属性

（1）在 prop name=中输入肋板属性名字为 Rib_SANDW。

（2）选择 type 类型为 SURFACE，选择 card image 类型为 P11_SH_SANDW。

（3）单击 create/edit，在卡片中输入以下参数：

N=10（10 表示肋板由 10 层材料组成）

Thick=2

VX=2

Ithick=1

（4）按照图 20-8 输入蒙皮属性中的铺层情况，Phi1（i）为铺层角度，t1（i）为铺层厚度，m1（i）为铺层对应的材料类型。

Ply (i)	Phi (i)	Thick (i)	Material
1	0	0.2	Composite
2	90	0.2	Composite
3	45	0.2	Composite
4	-45	0.2	Composite
5	0	0.2	Composite
6	45	0.2	Composite
7	-45	0.2	Composite
8	0	0.2	Composite
9	90	0.2	Composite
10	0	0.2	Resin

图 20-8　待输入的参数

（5）单击 return 退出。

STEP 11 把材料和属性赋予鸟体 component

（1）单击工具栏中的按钮，选中 update 面板。
（2）单击 comps，选中 SPH_PART，单击 select。
（3）双击 property，选中 SPH_Bird。
（4）双击 material，选中 Fluid_bird。
（5）单击 update。

STEP 12 把材料和属性赋予蒙皮 component

（1）单击 comps，选中 sheet_metal，单击 select。
（2）双击 property，选中 Skin_shell。
（3）双击 material，选中 Aluminum_6061T6。
（4）单击 update。

STEP 13 把材料和属性赋予肋板 component

（1）单击 comps，选中 Ribs，单击 select。
（2）双击 property，选中 Rib_SANDW。
（3）双击 material，选中 Composite。
（4）单击 update。

STEP 14 在机翼端面创建刚性单元

（1）在模型浏览器里选中 component：Ribs，使用鼠标右键单击 Make Current。

（2）单击 1D—rigids，选中 create 面板。

（3）在 nodes 2n 选项中，通过倒三角形下拉箭头选中 multiple nodes。

（4）在 primary node 选项中，通过倒三角形下拉箭头选中 calculate node。

（5）勾选所有的自由度 dof1～dof6，选择 elem types 为 RBODY。

（6）选择如图 20-9 所示的节点（可以先隐藏 component：sheet metal，方便选择）。

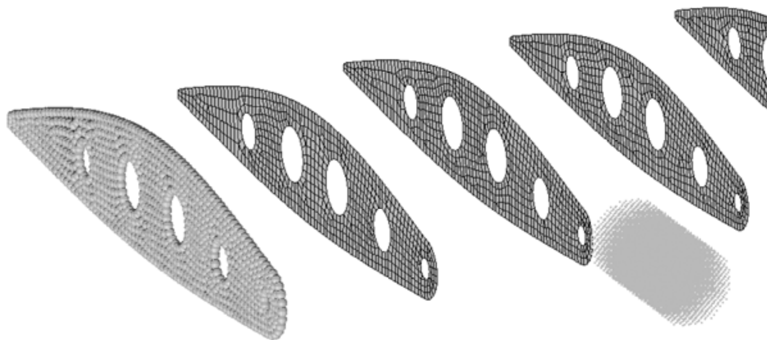


图 20-9　选择节点

（7）单击 create，创建刚性单元。

STEP 15 创建边界条件

（1）单击下拉菜单 Tools→BC Manager。

（2）在 Name 选项中输入 constriants。

（3）在 Select type 选项中选择 Boundary Condition。

（4）在 GRNOD 选项，单击倒三角下拉箭头选择 Nodes，并单击 Nodes。

（5）在图形区域中选择约束点，如图 20-10 所示，并单击 proceed。

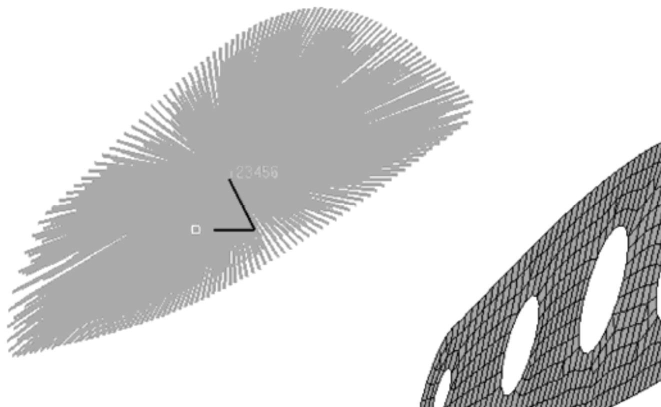


图 20-10　选择约束点

（6）勾选 Tx，Ty，Tz，Rx，Ry，Rz，对该点全自由度约束。

（7）单击 create 创建约束。

（8）在 Name 选项中输入 ini_velocity。

（9）在 Select type 选项中选择 Initial Velocity。

（10）在 GRNOD 选项，单击倒三角下拉箭头选择 Parts，并单击 Parts。

（11）在图形区域选择鸟体，或者单击 comps，选择 SPH_PART。

（12）单击 select。

（13）单击 proceed。

（14）在 Initial velocity components Vx 中输入−100，保持 Vy、Vz 为 0。这表明，鸟体的初始速度大小为 100m/s，方向为负 *X* 轴方向。

（15）单击 create 创建鸟体初始速度。单击 close，关闭 BC Manager。

STEP 16 创建鸟体和机翼的接触条件

（1）选中 Analysis 面板，单击 interfaces 面板。

（2）选中 create 子面板，在 name 选项中输入 bird_structure。

（3）选择 type 和 card image 类型为 TYPE7。

（4）单击 create 创建接触对。

（5）选中 add 子面板。

（6）单击 master 倒三角下拉箭头选择 entity，这时右边的 elems 高亮显示。

（7）单击 elems，选择 by collector，勾选 sheet metal 和 Ribs 两个 component。

（8）单击 select，选中这两个 component 的所有单元，也包含了刚体单元 RBODY。

（9）在图形区域上右击刚体 RBODY，把选中的 RBODY 单元去除，如图 20−11 所示。

（10）单击 add。

（11）单击 slave 倒三角下拉箭头选择 comps，这时右边的 comps 高亮显示。

（12）在图形区域中，选中鸟体的 component。

（13）单击 update。

（14）单击 review，查看接触对，如图 20−12 所示。

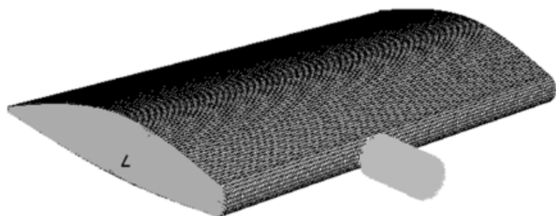


图 20−11　去除 RBODY 单元



图 20−12　查看接触对

（15）再次单击 review，还原视图。

（16）单击 card image 子面板，单击 edit 选项，并输入如下参数：

Idel=1

Stfac=0.1

Gapmin=1.5

（17）单击 return 两次退出到主面板。

STEP 17 编辑引擎文件

（1）在 Utility 浏览器中单击 Engine File

（2）弹出 Radioss Engine File Tool 窗口。

（3）在 GENERAL 选项卡中，按如图 20−13 所示设置参数。

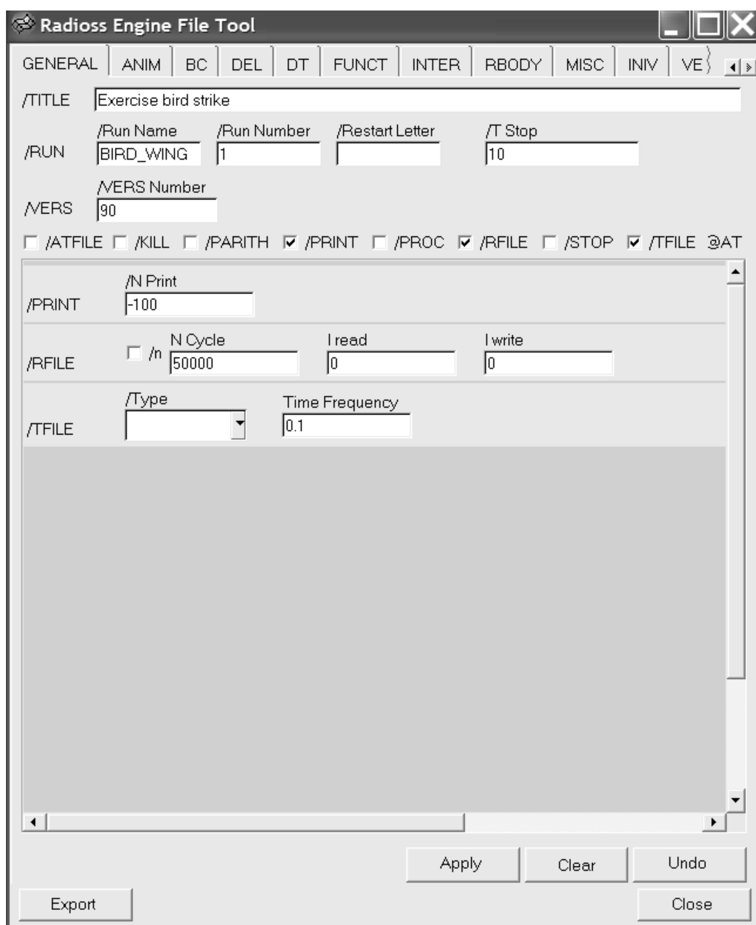


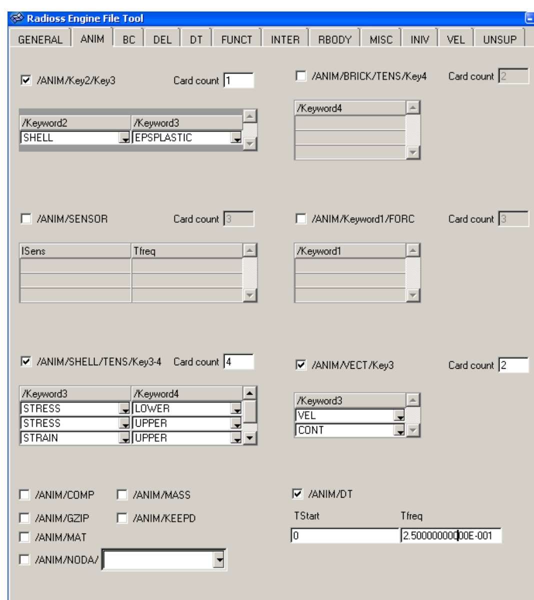
图 20−13　设置 GENERAL 选项卡的参数

（4）单击 Apply。

（5）在 ANIM 选项卡中，按如图 20−14 所示设置参数。

（6）单击 Apply。

（7）在 DT 选项卡中，按如图 20−15 所示设置参数。



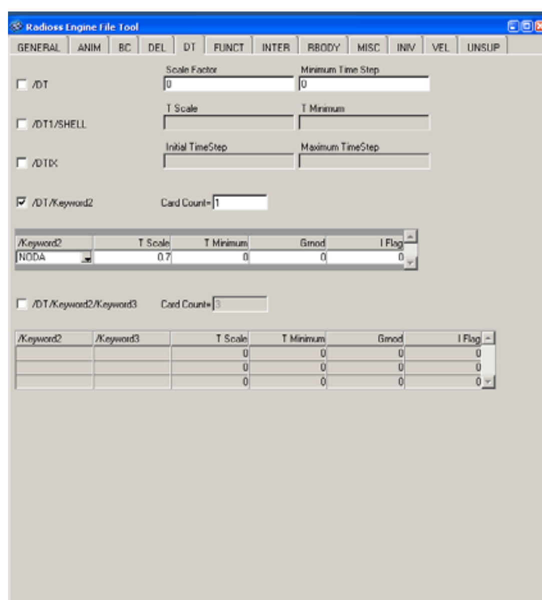


图 20-14　设置 ANIM 选项卡参数

图 20-15　设置 DT 选项卡参数

（8）单击 Apply。

（9）在 UNSUP 选项框中输入/ANIM/VERS/44。

（10）单击 Apply，再单击 Close。

STEP 18　定义控制卡片

（1）单击 Analysis→control card→MemoryReq。

（2）激活 NMOTS，输入 10 000。

（3）单击 return。

（4）单击 ALE_CFD_SPH 卡片。

（5）勾选 ALE_SPHGLO 选项。

（6）激活 SPHGLO_Alpha，输入 0.25。

（7）单击 return 两次退出。

STEP 19　导出模型

（1）单击工具栏中的按钮，在 file 中单击按钮，在弹出的选项框中选择保存路径。

（2）在 name 中输入文件名为 BIRD_WIND，单击 save。

（3）单击按钮，展开 Export option。

（4）勾选 Auto export engine file，使引擎文件和模型文件一并导出。

（5）单击 export，导出模型文件好引擎文件。

STEP 20 使用 RADIOSS Manager 求解文件

（1）单击 Start→Programs→Altair HyperWorks 11.0→RADIOSS。
（2）在 input file，打开模型文件 BIRD_WIND_0000.rad。
（3）在 option 选项中输入-both。
（4）单击 Run，求解模型。

20.3.2 实例教程——应用 ALE 方法进行船舶入水仿真

在这个教程里，我们将学习如何使用 RADIOSS 中的双相材料模型（Bi-Phase Material Law，Law37）进行船舶入水过程的数值模拟。模型的上部为空气，下部为水，流体均被边界单元包围。Law37 用于模拟空气、水以及流体边界。约束条件被施加于模型中边界单元的法向以模拟各类约束，并在船舶与流体间定义了接触界面（CEL）。

STEP 01 读取 RADIOSS Block 模板

（1）启动 HyperMesh。
（2）在 Preferences 菜单中，选择 User Profiles 或单击工具栏中的按钮。
（3）选择 RADIOSS（Block100），并单击 OK。

STEP 02 读取网格模型文件 boat_ditching_1.hm

（1）在工具栏中，单击 Open Model 按钮，并选择 boat_ditching_1.hm 文件。
（2）单击 Open，可以看到，船舶、空气及水体模型被读入到 HyperMesh 中。

STEP 03 为空气（Component Air）定义材料、单元类型，并进行 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 Air，单击 Edit。
（2）确定 card image 当前选择为 part。
（3）单击 Material，创建材料。
（4）选择 Assign material。
（5）在 name 文本框中，输入名称为 air。
（6）在 type 栏中，选择 FLUID，并在 card image 中，选择 M37_BIPHAS，然后单击 Creat Material。
（7）按如图 20-16 所示的内容完成相关参数的定义，并确认在 ALE CFD Formulation 中选择了 ALE 选项。
（8）单击 return，回到上级菜单。

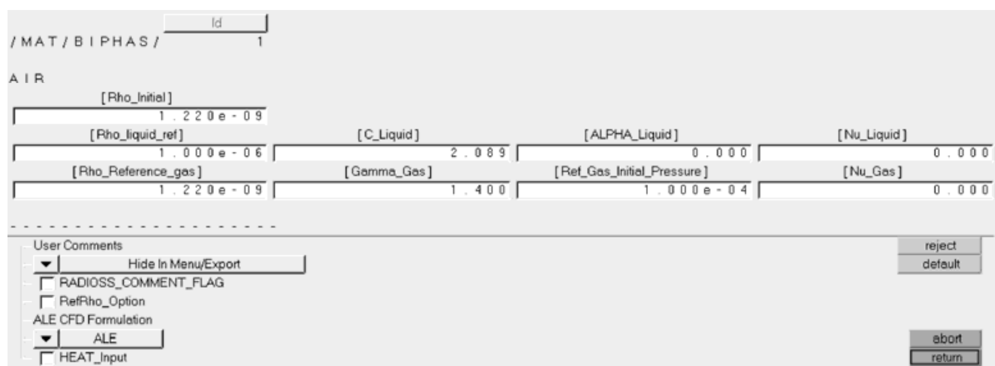


图 20-16　输入参数并确认 ALE 项 1

（9）单击 Property，创建单元类型。

（10）选择 Assign property。

（11）在 name 文本框中，输入 Air，在 type 中，选择 VOLUME。

（12）在 card image 中，选择 P14_SOLID，然后单击 Create Property。

（13）单击 return，回到上级菜单。

（14）单击 update，完成空气 Part 材料定义、单元类型的定义，以及 Part 声明。

STEP 04 为水体（Component Water）定义材料、单元类型，并完成 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 Water 单击 Edit。

（2）确定 card image 当前选择为 part。

（3）单击 Material，创建材料。

（4）选择 Assign material。

（5）在 name 文本框中，输入 water。

（6）在 type 栏中，选择 FLUID，并在 card image 中，选择 M37_BIPHAS，然后单击 Creat Material。

（7）按如图 20-17 所示的内容完成相关参数定义，并确认在 ALE CFD Formulation 中选择了 ALE 选项。

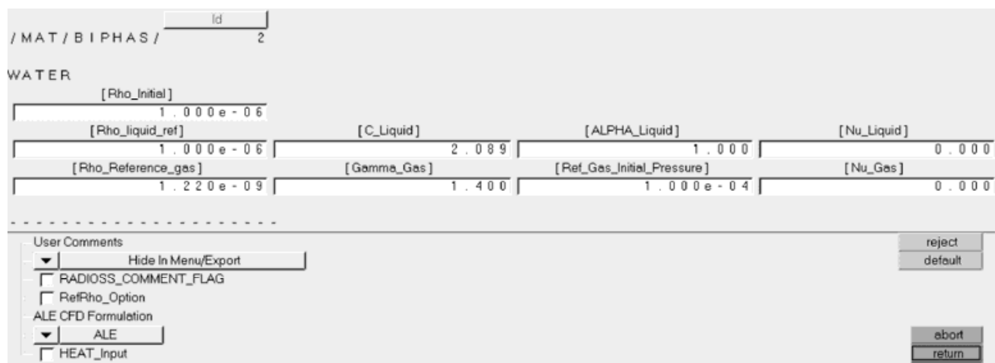


图 20-17　输入参数并确认 ALE 项 2

（8）单击 return，回到上级菜单。

（9）单击 Property，创建单元类型。

（10）选择 Assign property。

（11）在 name 文本框中，输入 water，并在 type 中选择 VOLUME。

（12）在 card image 中，选择 P14_SOLID，然后单击 Create Property。

（13）单击 return，回到上级菜单。

（14）单击 update，完成 Component water 的材料、单元类型定义以及 Part 声明。

STEP 05 为船体（Component Boat）定义材料、单元类型，并完成 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 Boat 单击 Edit。

（2）确定 card image 当前选择为 part。

（3）单击 Material，创建材料。

（4）选择 Assign material。

（5）在 name 文本框中，输入 boat。

（6）在 type 栏中，选择 Elastic，在 card image 中，选择 M1_ELASTIC，并单击 Creat Material。

（7）按以下内容输入理想线弹性材料材料参数：密度、杨氏模量和泊松比。

Density = 7.83E-06 kg/mm3

Young’s Modulus = 210 GPa

Poisson’s ratio = 0.3

（8）单击 return，回到上级菜单。

（9）单击 Property，创建单元类型。

（10）选择 Assign property。

（11）在 name 文本框中，输入 boat，并在 type 中选择 SURFACE。

（12）在 card image 中，选择 P1_SHELL，然后单击 Creat Property。

（13）在 thickness（THICK）中，输入 1.00。

（14）将 Ishell 设置为 24，并将 Number of integration points（N）设置为 5。

（15）单击 return，回到上级菜单。

（16）单击 update，完成 component boat 的材料类型、单元类型定义以及 Part 声明。

STEP 06 为空气边界（Component AIR-BC）完成材料类型、单元类型定义以及 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 AIR-BC 单击 Edit。

（2）确定 card image 当前选择为 part。

（3）单击 Material，创建材料。

（4）勾选 Assign Material。

（5）在 name 文本框中，输入 Air-BC。

（6）在 type 中，选择 FLUID，并在 card image 中选择 M37_BIPHAS，然后单击 Create Material。

（7）按如图 20−18 所示的内容输入相关参数，并确认在 ALE CFD Formulation 中选择了 ALE 选项。

图 20−18　输入参数并确认 ALE 项 3

（8）单击 return，回到上级菜单。

（9）单击 Property，创建材料类型。

（10）勾选 Assign Property。

（11）单击 prop，选择已定义的单元类型 AIR。

（12）单击 update，完成 component AIR-BC 的材料类型、单元类型以及 Part 声明。

STEP 07 为水体边界（Component WATER-BC）完成材料类型、单元类型定义以及 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 WATER-BC 单击 Edit。

（2）确定 card image 当前选择为 part。

（3）单击 Material，创建材料。

（4）勾选 Assign Material。

（5）在 name 文本框中，输入 water-BC。

（6）在 type 中，选择 FLUID，并在 card image 中选择 M37_BIPHAS，然后单击 Create Material。

（7）按如图 20−19 所示的内容输入相关参数，并确认在 ALE CFD Formulation 中选择了 ALE 选项。

（8）单击 return，回到上级菜单。

（9）单击 Property，创建材料类型。

（10）勾选 Assign Property。

（11）单击 prop，选择已定义的单元类型 AIR。

（12）单击 update，完成 component AIR-BC 的材料类型，单元类型以及 Part 声明。

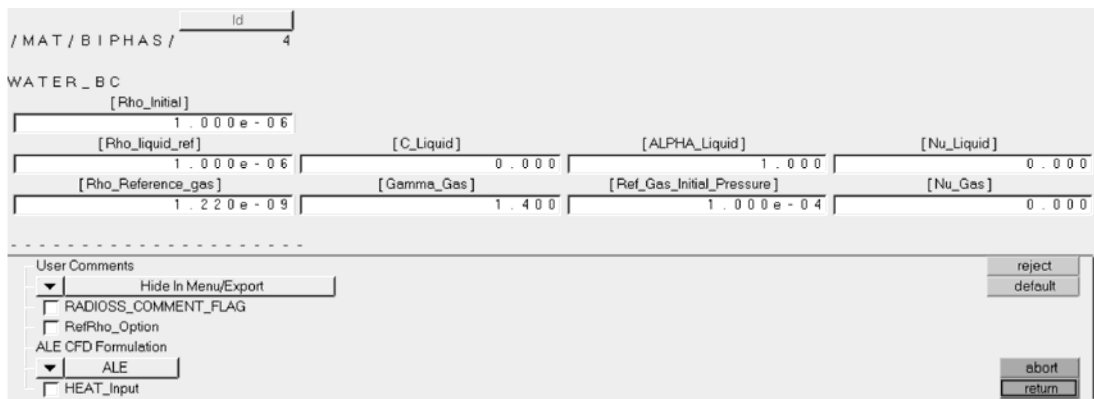


图 20−19　输入参数并确认 ALE 项 4

STEP 08 在船体和流体间建立接触

（1）在 Tools 下拉菜单中，选择 Create Cards→ALE-SPH-CFD→INTER_TYPE18。

（2）在 name 文本框中，输入 Boat-Fluid，并按回车键，此时，GUI 将引导用户进入 INTER_TYPE18 编辑界面。

（3）设置为 ISTF 为 1，设置 STFAC 为 0.001，并设置 GAP 为 22.5，如图 20−20 所示。

提示：将 GAP 值设置为 ALE Component 中平均单元尺寸的 1.5 倍为宜。

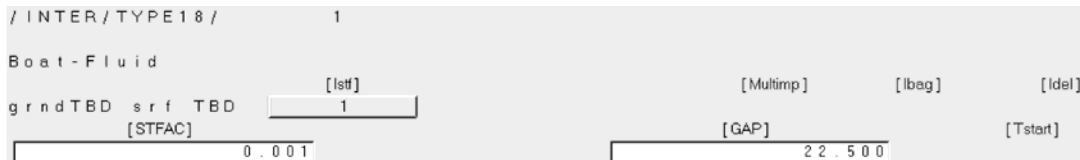


图 20−20　输入接触的参数

（4）单击 return，并切换到 add 面板。

（5）在 master selection 中，将选择类型切换为 comps，并选择名为 boat 的 component。

（6）单击 update。

（7）在 slave-selection 中，将选择类型切换为 comps，并选择模型中除了 boat 以外的所有 component。

（8）单击 update。

STEP 09 为船体创建刚性单元，并在刚性单元主节点附加集中质量

（1）通过 isolate 功能，在视图区域中仅显示 Part Boat。

（2）在 Utility 菜单中，选择 RBODY Manager，或在 Tools 下拉菜单中，选择 Rbody Manager。

（3）在 Title 栏中，输入 boat-rigid。确认 Master Node 设置为 Calculate Node，Slave node

（s）设置为 Parts，单击 Parts 图标，并选择 Part Boat，如图 20–21 所示。

（4）单击 Create，创建刚性单元。

（5）在刚性单元一览表中选择此前创建的 RBODY，并单击 Edit card 图标。

（6）进入属性编辑面板后，在 mass 栏中输入 23.04，以模拟附加质量。

（7）单击 return，回到上级菜单。

（8）单击 close，关闭 RBODY Manager。

STEP 10 创建初始速度

（1）在 Utility Menu 中单击 BSs Manager，或通过 Tools 下拉菜单，选择 BSs-Manager。

（2）在 name 文本框中，输入 Boat。

（3）在 Select type 中，选择 Initial Velocity。

（4）将 GRNOD 设置为 Nodes。

（5）单击 Node 图标，并选择在步骤（4）中，创建的刚性单元的主节点（master node）。

（6）设置 Z velocity（VZ）为−11.0，即沿 Z 轴负方向的初始速度，其大小为 11.0。

（7）单击 create，完成初始速度创建，如图 20–22 所示。

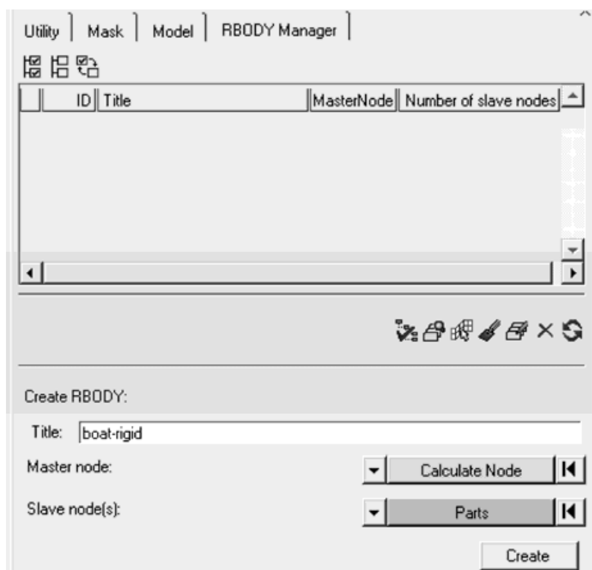


图 20–21　创建刚性单元

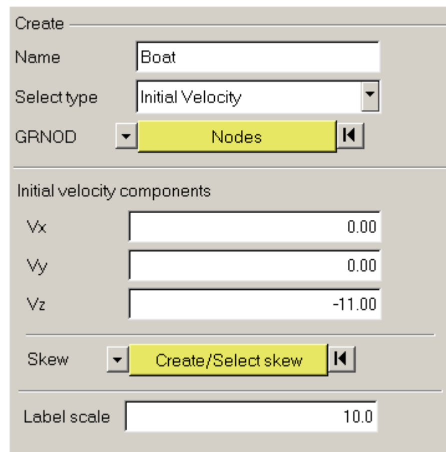


图 20–22　初始速度的创建

STEP 11 为空气及水体的表面节点创建约束

（1）在 Utility Menu 中单击 BSs Manager，或通过 Tools 下拉菜单，选择 BSs-Manager。

（2）在视图区域中，重新显示模型中的所有 Part。

（3）在 name 文本框中，输入 constraints-x。

（4）在 Select type 中，选择 Boundary condition。

（5）将 GRNOD 设置为 Nodes。

（6）选择空气域及水体网格两侧各一个节点。

（7）然后在 nodes 黄色面板上单击鼠标左键或右键，在弹出的高级选择菜单中，选择 By Face，HyperMesh 会自动选择所有与此前预选的两个节点处于同一 face 内的所有节点，如图 20−23 所示。

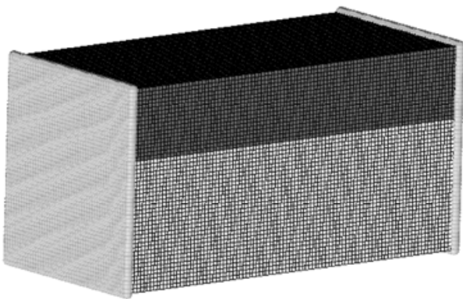


图 20−23　选择节点

（8）勾选 Tx 复选框，约束所有节点沿 *X* 方向的平动自由度。

（9）单击 creat，完成约束的创建。

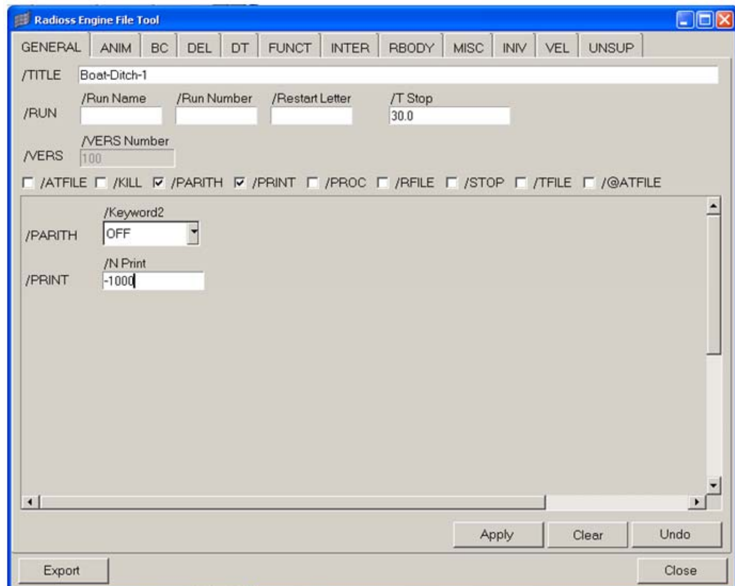
（10）与以上方式类似，完成空气域及水体网格外表面处于 *X-Z* 平面内的所有节点沿 *Y* 轴的平动自由度的约束。

（11）与以上方式类似，完成空气域及水体网格外表面处于 *X-Y* 平面内的所有节点沿 Z 轴平的动自由度的约束。

STEP 12 设置控制卡片及输出要求

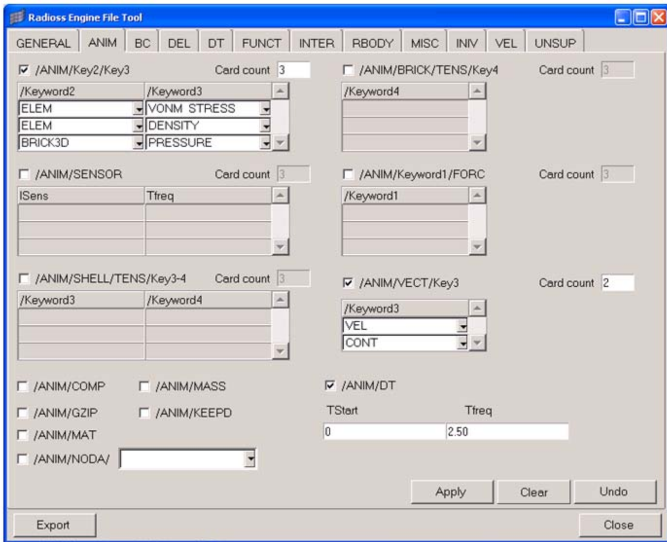
（1）在 Utility Menu 中，选择 RADIOSS Tools，然后选择 Engine File，此时，用户界面中将弹出 RADIOSS Engine File 对话框。

（2）在 GENERAL，ANIM，以及 DT 窗口中，按如图 20−24 所示的方式完成各项参数定义。

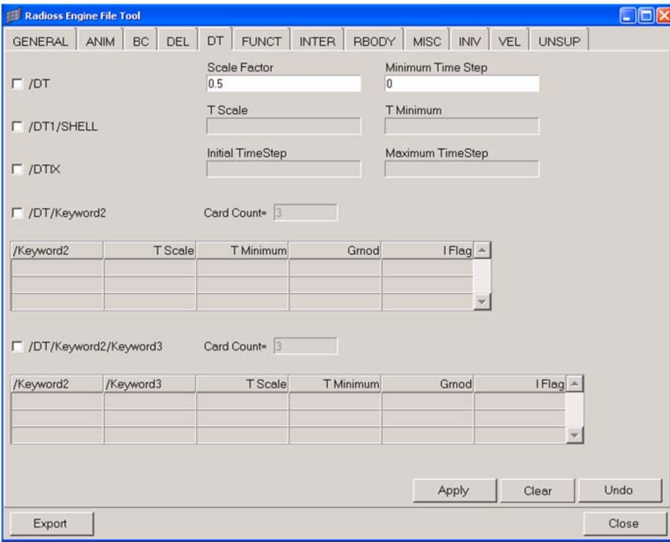


a)

图 20−24　输入各个窗口的参数



b)



c)

图 20–24　输入各个窗口的参数（续）

（3）单击 Apply→Close。

（4）此外，在 HyperMesh 主菜单中的 Analysis 页面下，如图 20–25 所示的控制卡片需要激活和定义。

HeaderCard	ReferenceStateFile	ALE_CFD_SPH
HeaderCommentsCard	AnalysisFlags	AdaptiveGlobalMesh
TitleCard	SolidDefault	Animation_Version
MemoryReq	ShellDefault	Architecture_Flag
Spmd	RandomCard	UnsupportedCards
IOFlagCard	FooterCommentsCard	
InitialStateFile	Units System	

图 20–25　需要激活和定义的控制卡片

（5）在 TitleCard 中，输入分析的名称为 BOAT-DITCH1。

（6）在 MemoryReq 卡片中，输入 NMOTS 为 40 000，定义分析占用内存。

（7）在 Spmd，IOFlagCard 以及 AnalysisFlages 卡片中，保持默认设置。

（8）在 ALE_CFD_SPH 卡片中，单击 ALE_Grid_Velocity，使其处于激活状态。

STEP 13 输出模型并提交求解

（1）在 File 下拉菜单中，单击 Export，或者单击 Export 按钮（ 标准 HyperMesh 界面，或 HyperWorks DeskTop）。

（2）指定输出目标文件夹。

（3）在 name 文本框中，输入 boatditching_1，并单击 Save。

（4）在输出栏的下部，打开 Export Options 面板。

（5）勾选 Merge starter and engine file。

（6）单击 Export，完成模型输出。

（7）选择 Start→Programs→Altair HyperWorks 11.0→RADIOSS。

（8）RADIOSS 完成启动后，在 Input file 栏中，选取此前输出的 boatditching_1_0000.rad 文件，如图 20-26 所示。

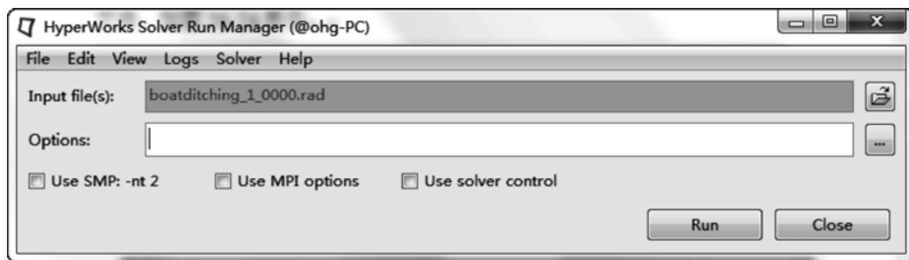


图 20-26 选取 RADIOSS 文件

STEP 14 使用 HyperView 查看求解结果（可选）

单击 Save，保存当前 HyperMesh 作业，并启动 HyperView，查看求解结果。

提示：本教程使用流体边界单元及其施加的边界条件来得到一个无限流体域，如果不使用流体边界单元，该有限离散空间将被视为封闭空间，相当于船舶进入了一个封闭的有限空间。读者可自行使用模型文件 boat_ditching_2.hm 重做上述各步骤，在约束边界条件施加时，直接选取流体的外表面即可。

20.3.3 实例教程——水下爆炸仿真

在这个教程，我们将学习如何使用 Radioss 中的多相材料 multi-phase material law（law51）进行炸药起爆数值模拟。炸药置于水体中，水体网格的周围被边界单元包络以模拟

无限水域。在水体表面覆盖有一层金属板。各类边界条件被施加在边界单元上。

STEP 01 加载 RADIOSS Block 模板

（1）启动 HyperMesh。

（2）在 Preferences 菜单中，选择 User Profiles 或单击工具栏中的按钮。

（3）选择 RADIOSS（Block100），并单击 OK。

STEP 02 读取网格模型文件 explosion.hm

（1）在工具栏中，单击 Open Model按钮，选择 explosion.hm 文件。

（2）单击 Open。

STEP 03 为炸药（Component C4）定义材料类型，单元类型并进行 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 Component C4，并单击 Edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Material，创建材料。

（4）勾选 Assign Material。

（5）在 name 文本框中，输入 high-pressure-air。

（6）在 type 中，选择 Other，并在 card image 中，选择 MATLAW51，并单击 Create Material。

（7）按如图 20–27 所示的内容输入烈性炸药材料参数，并确认在 ALE_CFD_SIMULATION 中勾选了 ALE 选项。

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/LAW51/1
high-pressure-air
#              RHO_I               RHO_0
          0.00007135                   0
#     Iflg
         0
#              P_ext                  NU               LAMDA
                   0                   0                   0
#phase 1:  AIR high pressure
#            ALPHA_1              RHO_01                E_01              P_min1                C_01
                   1          0.00007135                  15              -1E-20                   0
#               C_11                C_21                C_31                C_41                C_51
                   0                   0                   0                 0.4                 0.4
#                G_1                  NU
                   0                   0
#phase 2:  water
#            ALPHA_2              RHO_02                E_02              P_min2                C_02
                   0              1.0E-6                   0              -1E-20                   0
#               C_12                C_22                C_32                C_42                C_52
               2.089                   0                   0                   0                   0
#                G_2
                   0
#phase 3:  water
#            ALPHA_3              RHO_03                E_03              P_min3                C_03
                   0              1.0E-6                   0              -1E-20                   0
#               C_13                C_23                C_33                C_43                C_53
               2.089                   0                   0                   0                   0
#                G_3
                   0
/ALE/MAT/1
                   0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

图 20–27　烈性炸药的材料参数

（8）单击 return，回到上级菜单。

（9）单击 Property，创建单元类型。

（10）勾选 Assign Property。

（11）在 name 文本框中，输入 solids，在 type 中，选择 VOLUME。

（12）在 card image 中，选择 P14_SOLID，单击 Create Property。

（13）单击 return，回到上级菜单。

（14）单击 update，完成 Component C4 的材料类型，单元类型的定义以及 Part 声明。

STEP 04 为空气（Component Air）定义材料类型、单元类型，并进行 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 Component Air，并单击 Edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Material，创建材料。

（4）勾选 Assign Material。

（5）在 name 文本框中，输入 air。

（6）在 type 中，选择 Other，并在 card image 中，选择 MATLAW51，并单击 Create Material。

（7）按如图 20−28 所示的内容输入材料参数，确认在 ALE_CFD_SIMULATION 中勾选了 ALE 选项。

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/LAW51/2
air
#               RHO_I               RHO_0
              1.0E-6                   0
#     Iflg
         0
#               P_ext                  NU               LAMDA
                    0                   0                   0
#phase 1:  AIR high pressure
#             ALPHA_1              RHO_01                E_01              P_min1                C_01
                    0          0.00007135                  15              -1E-20                   0
#                C_11                C_21                C_31                C_41                C_51
                    0                   0                   0                 0.4                 0.4
#                 G_1                  NU
                    0                   0
#phase 2:  water
#             ALPHA_2              RHO_02                E_02              P_min2                C_02
                    1              1.0E-6                   0              -1E-20                   0
#                C_12                C_22                C_32                C_42                C_52
                2.089                   0                   0                   0                   0
#                 G_2
                    0
#phase 3:  water
#             ALPHA_3              RHO_03                E_03              P_min3                C_03
                    0              1.0E-6                   0              -1E-20                   0
#                C_13                C_23                C_33                C_43                C_53
                2.089                   0                   0                   0                   0
#                 G_3
                    0
/ALE/MAT/2
                    0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

图 20−28　输入材料参数并确认 ALE 项 5

（8）单击 return，回到上级菜单。

（9）单击 property=，然后选择步骤（8）中创建的 property solids。

（10）单击 update，完成 Component Air 的材料类型、单元类型的定义以及 Part 声明。

STEP 05 为水体表面（Component Boundary）定义材料类型、单元类型，并进行 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 Component Boundary，并单击 Edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Material，创建材料。

（4）勾选 Assign Material。

（5）在 name 文本框中，输入 boundary。

（6）在 type 中，选择 OTHER，并在 card image 中，选择 MATLAW51，然后单击 Create Material。

（7）按如图 20−29 所示的内容输入材料参数，并确认在 ALE_CFD_SIMULATION 中勾选了 ALE 选项。

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/LAW51/3
boundary
#              RHO_I               RHO_0
                1E-6                   0
#     Iflg
         3
#              P_ext                  NU               LAMDA
                   0                   0                   0
#            ALPHA_1              RHO_01                E_01              P_min1                C_01
                   0          0.00007135                  15              -1E-20                   0
#               C_11                C_21                C_31                C_41                C_51
                   0                   0                   0                   0                   0
#                G_1                  NU
                   0                   0
#            ALPHA_2              RHO_02                E_02              P_min2                C_02
                   0                1E-6                   0              -1E-20                2E-4
#               C_12                C_22                C_32                C_42                C_52
                   0                   0                   0                   0                   0
#                G_2
                   0
#            ALPHA_3              RHO_03                E_03              P_min3                C_03
                   0                1E-6                   0              -1E-20                2E-4
#               C_13                C_23                C_33                C_43                C_53
                   0                   0                   0                   0                   0
#                G_3
                   0
/ALE/MAT/3
                   0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

图 20−29　输入材料参数并确认 ALE 项 6

（8）单击 return，回到上级菜单。

（9）单击 Property，创建单元类型。

（10）勾选 Assign Property。

（11）选择此前创建的 property Solids。

（12）单击 update，完成 Component Boundary（边界单元）的材料类型、单元类型定义以及 Part 声明。

STEP 06 为金属盖板（Component metallic frame）创建材料类型、单元类型并进行 Part 声明

（1）在模型浏览器 Model Browser 中，选择 Component metallic frame，并单击 Edit。

（2）确认 card image 设置为 Part。

（3）单击 Material，创建材料。

（4）勾选 Assign Material。

（5）在 name 文本框中，输入 metallic frame。

（6）在 type 中，选择 ELASTIC_PLASTIC，并在 card image 中，选择 M2_PLAS_JOHNS。

（7）按如图 20−30 所示的内容输入材料相关参数。

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/PLAS_JOHNS/4
steel
#               RHO_I
               7.86E-6                 0
#                   E                 Nu
                  205                .29
#                   a                  b                  n            EPS_max             SIG_max0
                   .2                .45                0.5               0.15                    0
#                   c              EPS_0       ICC  Fsmooth              F_cut
                    0                  0         0        0                  0
#                   m             T_melt             rhoC_p                T_r
                    0                  0                  0                  0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

图 20−30　输入材料相关参数

（8）单击 return，回到上级菜单。

（9）单击 Property，创建单元类型。

（10）勾选 Assign property。

（11）选择此前创建的 property Solids。

（12）单击 update，完成 Component metallic frame 的材料类型、单元类型创建，以及 Part 声明。

STEP 07 在实体单元表面节点创建边界条件

（1）在 Utility Menu 中，选择 BS’s Manager。

（2）在 name 文本框中，输入 constraints，并在 Select type 选择为 Boundary Condition，并将 GROND 设置为 Nodes。

（3）按如图 20−31 所示，选择模型底部表面及侧部表面各任意一节点。

（4）在 Nodes 面板上单击鼠标左键或右键，在弹出的高级选择工具中选择 by Face，HyperMesh 将自动选择底部表面及侧部表面的所有节点，如图 20−32 所示。

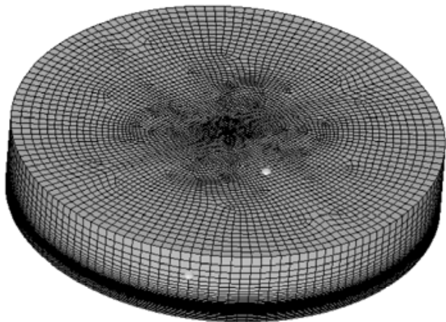


图 20−31　选择模型底部和侧部的节点

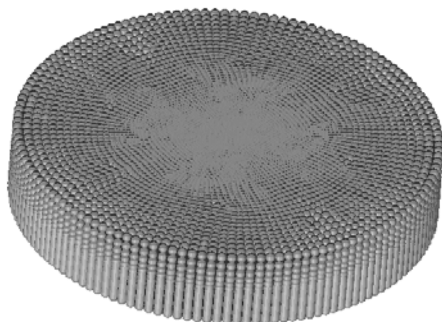


图 20−32　选中两个表面的所有节点

（5）约束所有选中节点的 3 个平动自由度，如图 20-33 所示。

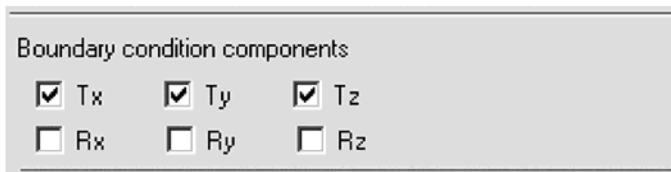


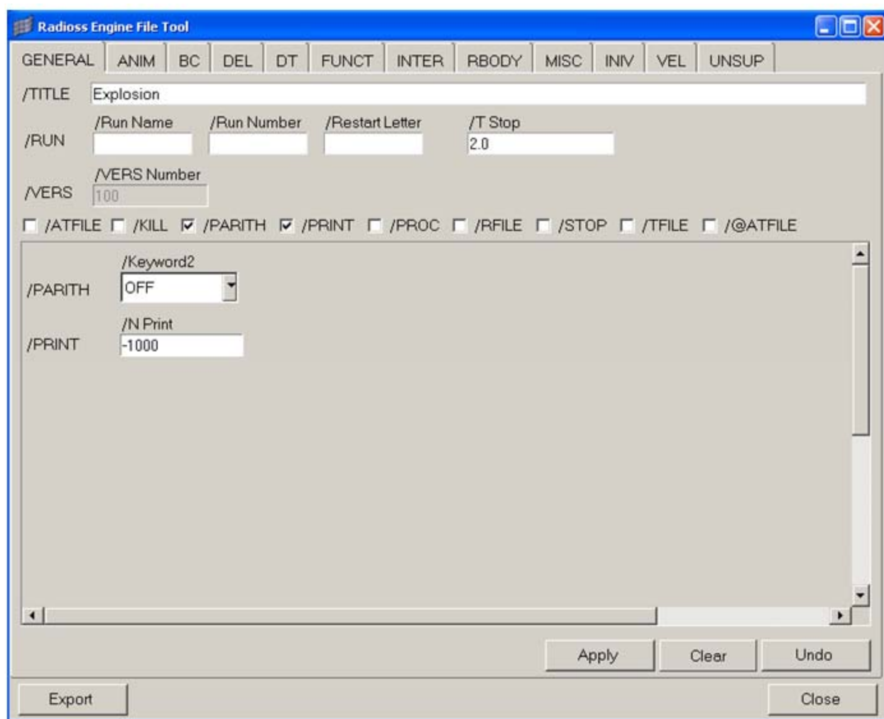
图 20-33　约束 3 个平动自由度

（6）单击 Create，完成边界条件定义。
（7）在 boundary condition 上单击鼠标右键，选择 card edit。
（8）勾选 ALE_BCS option，将该边界条件设置为 ALE 类型。

STEP 08 设置控制卡片和输出要求

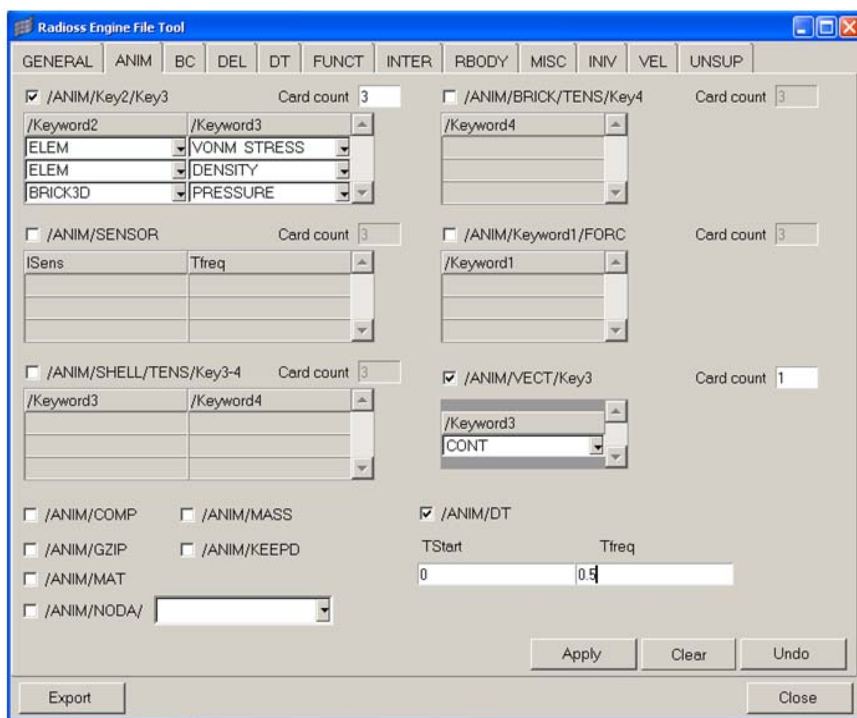
（1）Utility 菜单中，选择 Radioss Tools，然后选择 Engine File，RADIOSS Engine File 工具将自动弹出。

（2）按如图 20-34 所示的方式设置 GENERAL、ANIM 以及 DT 窗口中的相关参数。

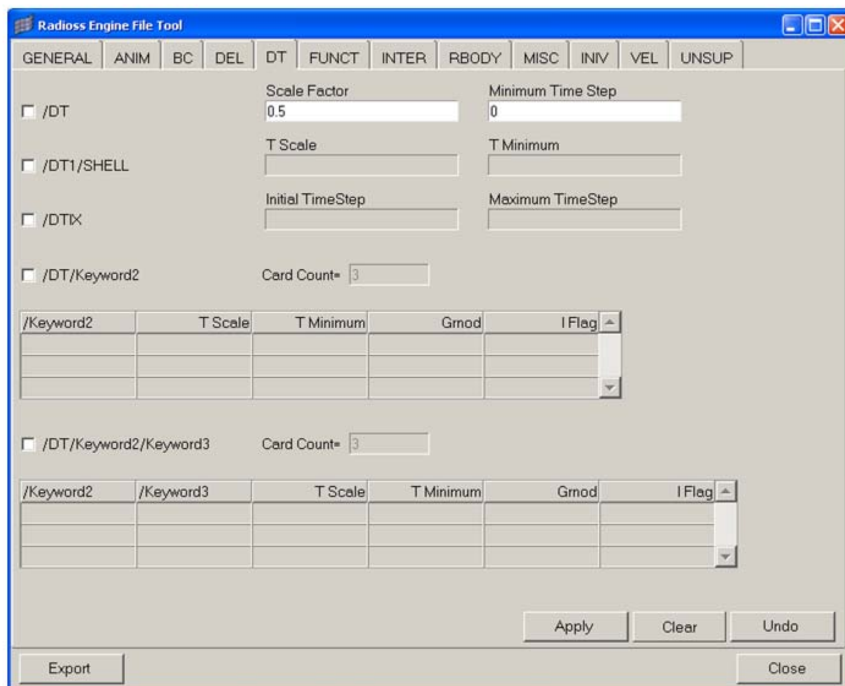


a)

图 20-34　设置 GENERAL、ANIM、DT 所需的参数



b)



c)

图 20-34　设置 GENERAL、ANIM、DT 所需的参数（续）

（3）单击 Apply→Close。

（4）在 HyperMesh 主菜单的 Analysis 页面下，选择 Control-Cards，本例中需要激活的控制卡片如图 20−35 所示。

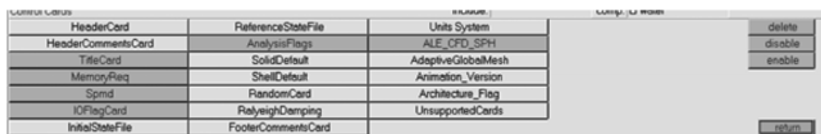


图 20−35　需要激活的控制卡片

（5）在 TitleCARD 中，输入分析的名称为 EXPLOSION。

（6）在 MemoryReq 卡片中，输入 NMOTS 为 40 000。

（7）激活 Spmd、IOFlagCard 和 AnalysisFlags 卡片，并保持默认设置。

（8）在 ALE_CFD_SPH 卡片中，按如图 20−36 所示的内容进行参数设置。

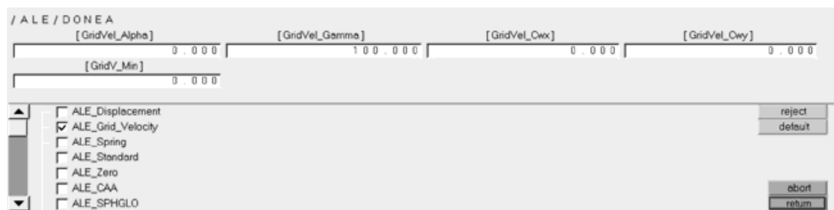


图 20−36　ALE_CFD_SPH 卡片参数设置

STEP 09 输出模型并提交计算

（1）在 File 下拉菜单中，单击 Export，或者单击 Export 按钮（ 标准 HyperMesh 界面，或 HyperWorks DeskTop）。

（2）指定输出目标文件夹。

（3）在 name 文本框中，输入 explosion，并单击 Save。

（4）在输出栏的下部，打开 Export Options 面板。

（5）勾选 Merge starter and engine file。

（6）单击 Export，完成模型输出。

（7）选择 Start→Programs→Altair HyperWorks 11.0→RADIOSS。

（8）RADIOSS 完成启动后，在 Input file 文本框中，选取此前输出的 explosion_0000.rad. 文件，如图 20−37 所示。

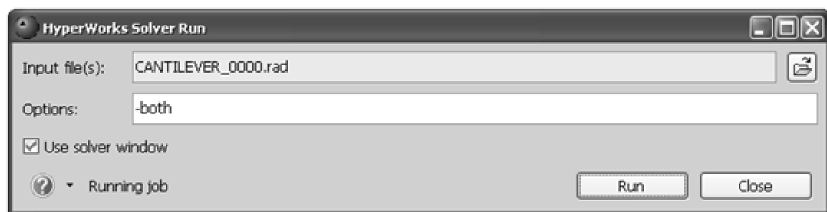


图 20−37　选择 RADIOSS 文件

计算完成后启动 HyperView，查看求解结果。

20.4 本章小结

本章简要地介绍了 SPH 和 ALE 方法的基本概念，并通过 3 个典型的应用案例教程示范了它们在流固耦合方面的应用方法。其中，鸟撞分析教程简化自一个真实鸟撞分析案例，除 SPH 鸟体的建模外，整个鸟撞的分析流程和涉及的多层复合材料建模也值得学习和借鉴。而应用 ALE 进行流固耦合仿真时，需要使用双相材料模型 LAW37 和多相材料模型 LAW51，并固体定义拉格朗日网格和流体 ALE 网格之间的耦合作用（Interface Type 18），还需要特别注意无限域（无反射边界）的模拟方法。

第 21 章

RADIOSS Block 隐式分析



RADIOSS Block 还包含隐式时间积分格式。在显式积分格式里，速度和位移是由节点加速度直接积分得到的。在这种格式下，保证算法稳定性的原因，是由于积分时间步长通常很小。因此，对于持续时间很长的静态或缓慢动态问题，需要非常多的积分循环。这时，可以使用隐式时间积分格式来求解替代显式方法。可以证明的是，隐式时间积分算法是无条件稳定的，因而可以使用相对于显式积分更大的积分步长。但是，对于隐式积分格式，需要计算每个载荷步中每个迭代步的总体刚度矩阵，并需要求解总体平衡方程，每个载荷步需要更多计算消耗，并对计算内存提出更高的要求。

本章重点知识

21.1　RADIOSS Block 隐式功能介绍
21.2　激活隐式分析
21.3　隐式求解器
21.4　准静态分析
21.5　非线性分析
21.6　RADIOSS Block 隐式分析 Engine 文件示例
21.7　实例教程——搭接接头隐式非线性分析实例
21.8　本章小结

对于高度几何非线性和材料非线性行为的高动态问题，使用显式求解的好处是显而易见的，所有的物理量都被当做向量存储，存储很低，需要积分的时间循环可能非常多，但整体的效率是好的。隐式方法对于静态问题或持续时间很长的问题更有效。

最佳方案就是同一个求解器同时有显式和隐式求解功能。另外，在 RADIOSS Block 里，显式和隐式共用的内力计算格式，这样两种不同的积分格式可以无缝过渡和转换。因而，这两种格式可以在多状态耦合的分析中使用，比如冲压成型仿真（显式格式）后进行回弹分析（隐式格式），在碰撞仿真（显式格式）前先进行重力载荷初始化（隐式格式）。

尽管隐式格式是无条件稳定的，但是它不是无条件收敛的（非线性情况下）。它比显式算法稳健性差，为得到收敛的结果，可能用户需要更多的调试。

本章将介绍 RADIOSS Block 对于不同的隐式问题可用的功能，激活隐式分析的关键字，其中会介绍一些细节使读者对 RADIOSS Block 功能理解得更清楚，尤其是如何选择合适的求解算法和如何减少非线性分析的控制参数，有经验的读者可以直接从这些章节开始。最后给出典型的用于隐式求解的 Engine 文件实例。

21.1 RADIOSS Block 隐式功能介绍

RADIOSS Block 支持如下隐式分析类型。

（1）模型检查：使用卡片/IMPLICIT/CHECK。

（2）静态或准静态线性分析。

（3）屈曲模式分析。

（4）静态或准静态非线性分析。

（5）动力非线性分析。

（6）模态分析（尽管 RADIOSS Block 也支持模态分析，但是推荐使用 RADIOSS Bulk 求解模态问题）。

需要注意的是，并不是所有 RADIOSS Block 格式的显式功能都可以用于隐式分析，本节所列的功能都是 RADIOSS Block 格式隐式求解可用的功能和特性。

21.1.1 单元公式

在 RADIOSS Block 隐式分析里，单元公式主要用在两个计算之中：

（1）决定位移的刚度矩阵，隐式可用的单元公式如表 21−1 所示。如果使用了其他类型的单元公式（不在表中的单元公式），求解器将自动使用带星号（*）的单元公式。

表 21−1　隐式可用的单元公式

Shell 4n	Shell 3n	Solid 8n	Solid 4n,10n	Beam	Thick-shell 8n,6n	Springs（4,8,12,13）
QEPH*, QBAT	TC0*	HA8*	standard	standard	HSEPH,HA8*	standard

（2）应变、应力和节点力，隐式和显式共用代码。

Truss 单元，监测体积（Type 3，轮胎），正交各向异性 Shell 单元（Type 9，10，11）也支持隐式求解。通常，除了一些特殊的二阶段元（如 S16），所有的单元公式都不存在兼容

性问题。S20（Solid 20 节点）单元，正交各向异性 Solid（Type 6）在 RADIOSS Block V11 的隐式分析里也是支持的。但是，推荐使用上述表格里的单元公式，尤其是非线性隐式分析。

21.1.2 材料兼容性

事实上，RADIOSS Block 在隐式分析时仅使用材料的弹性参数构造刚度矩阵（对于非线性来说，构造雅可比矩阵），这对于当前两种非线性求解算法是足够的：改进的牛顿法（Modified Newton，某些情况下叫做初始应力法）和拟牛顿法（Quasi-Newton，BFGS）。因此，RADIOSS Block 隐式求解不存在材料兼容性问题。

21.1.3 运动学条件

下列运动学条件支持 RADIOSS Block 隐式求解：

（1）位移边界条件（/BCS）。

（2）强制位移（/IMPDISP）、强制速度（/IMPVEL）和强制加速度（/IMPACC）。

（3）刚体（/RBODY）。

（4）绑定接触（Interface Type 2）（不带失效）。

（5）刚性墙（/RWALL）。

（6）自适应网格（/ADMESH）。

（7）线性插值约束单元（/RBE3）。

21.1.4 接触

只有 Interface Type 7，10，11 三种接触类型可以在 RADIOSS Block 隐式求解里使用。但是 Interface Type 7 里的某些选项是不能用于隐式分析的，如 $I_{curv} > 0$, $I_{fric} > 0$, Ibc。

接触处理是基于罚函数方法（使用虚拟弹簧），接触刚度在刚度矩阵里独立存储。一旦识别到接触，这个刚度矩阵的信息可以通过定义卡片/IMPL/PRINT/NONLIN/n 由求解器输出来。

21.1.5 载荷

集中载荷（/CLOAD）、压力载荷（/PLOAD）和重力载荷（/GRAV）都可用于隐式分析，其定义方式与显式求解一样。为了提高求解的收敛性，在隐式非线性分析中，最好定义时间历程型的载荷。在某些情况下，最好定义随时间逐渐增大的载荷，而不是强制的恒定载荷，即使是恒定的重力加速度和强制位移。

21.2 激活隐式分析

激活 RADIOSS Block 隐式分析需要在 Engine 文件里定义/IMP 相关的卡片，除了/EIG 卡片是需要在 Starter 文件里定义以外。大部分的输出控制项，隐式和显式的意义是一样的。

对于静态问题，也用到时间步。这个时间步长不是物理时间步长，仅用于定义位移和载荷的增量，循环数仅表示增量数目。

对于 Engine 文件，两者没有太大的差别。但是需要注意的是，打印输出/PRINT（例如/PRINT/-1 将打印每个增量步）和一些输出文件的频率，因为在隐式里我们使用了很大的时间步长。

注：在本节后文里以星号（*）标注的关键字卡片是指该类分析所必需的卡片。

21.2.1 线性分析

线性分析使用的基本关键字有以下几个。

1．线性静态

（1）*/IMPL/LINEAR：静态线性计算。

（2）/IMPL/SOLVER/n：线性求解方法，*n* 的值表示不同的线性方程求解器。

（3）/IMPL/PRINT/LINEAR/Nprint：线性分析的打印输出频次，主要用于迭代求解器（或混合求解器）。当使用直接求解器时，将打印相对残差。

（4）/IMPL/LINEAR/INTER：这个选项允许在线性分析中考虑接触，通过使用简单的两步线性的方式：一个初始的线性步用于评估接触渗透，在后续的第二个线性步里产生接触反作用力弹簧。

2．线性准静态

（1）*/IMPL/QSTAT：准静态分析。

（2）/IMPL/QSTAT/DTSCAL：增加的惯性刚度的缩放系数，当该选项与/IMPL/LINEAR/INTER 同时使用时，该缩放因子将作用于第二个线性迭代步。

3．欧拉屈曲

（1）*/IMPL/BUCKL：欧拉屈曲模式。

（2）*/IMPL/LINEAR：静态线性计算。

（3）/IMPL/BUCKL/1：兰索士法提取屈曲模式（卡片参数定义同 RADIOSS Bulk 格式）；/IMPL/BUCKL/2：重启动分析或带预应力的屈曲，用于求解预应力状态的真实屈曲模式。

当分析类型为屈曲分析时，结果动画文件（*Annn）的查看方式是特殊的：每个文件包含一个屈曲模式（而对应的临界载荷则用时间值来表示），如果在屈曲计算之前有线性计算，则前两个结果动画文件（*A001,*A002）包含的是线性结构计算的结果，而屈曲模式计算结果从第三个结果动画文件（*A003）开始。

21.2.2 非线性分析

在隐式非线性分析中需要使用迭代求解，求解过程通常被分成多个增量步用于处理非线性，增量步使用时间步长来表示。在每个增量步内，非线性求解器（牛顿法）将基于更新的几何构型（大位移、大应变）寻找力平衡。

非线性分析需要定义两类控制参数：非线性求解器类型（使用关键字/IMPL/NONLIN/n，

其中不同的 n 值表示不同的求解器）和步长（使用卡片 /IMPL/DT/n ，/IMPL/DTINI 和 /IMPL/DT/STOP）

非线性分析使用的基本关键字有以下几个。

（1）* /IMPL/NONLIN/n：非线性求解方法，*n* 的值表示不同的非线性方程求解器。

（2）/IMPL/SOLVER/n：线性求解方法，*n* 的值表示不同的线性方程求解器。

（3）/IMPL/PRINT/NONLIN/Nprint：非线性分析迭代的打印输出频次。

（4）* /IMPL/DT/n：时间步长控制，*n* 值表示不同的时间步长控制方法。

（5）* /IMPL/DTINI：初始时间步长。

（6）/IMPL/DT/STOP：最小—最大时间步长值。

（7）/IMPL/QSTAT：准静态分析。

（8）/IMPL/SPRBACK：回弹计算。

21.3 隐式求解器

RADIOSS 隐式分析功能包含的隐式求解器有两种：线性求解器（直接求解器、迭代求解器和混合求解器）和非线性求解器（改进的牛顿法和拟牛顿法）。

线性求解器可以在线性分析和非线性分析两种类型中使用，因此选择合适的求解器是非常重要的。自 RADIOSS Block 的隐式求解功能发布起，PCG（Preconditioned Conjugate Gradient，预处理共轭梯度）求解器就已经包含在内了，从 HW 9.0 开始，又增加了直接求解器。默认的求解器是分解近似反演预处理方法的 PCG 求解器（PCG with Factored Approximate Inverse Preconditioning Method）。选择合适的求解器通常依赖求解的问题模型。一般地，迭代求解器适合状态良好的均匀刚度模型（比如，solid 单元模型），而对于均匀刚度病态模型的计算则很昂贵。另一方面，直接求解器可以得到更加精确的结果，并对质量矩阵低敏感，但是需要更多的内存存储。当使用 out-of-core 时，直接求解器的计算效率将大大降低。

对于特定的问题，如果不能确定哪种求解器合适，在内存没有瓶颈的情况下，建议首先尝试直接求解器。对于大规模的模型，比如整车分析模型，内存需求可能不满足期望，这时可以使用更高质量预处理算子的 PCG 方法（在关键字/IMPL/PREPAT/n 里设定，比如 *n*=2）。对于非线性分析，可以在进行实际的分析之前先进行一个简单的线性求解以比较两种方法，这样做可能是值得的，两者的结果有可能并没有太大差别。对于接触刚度自由度远低于总自由度的接触仿真中，混合求解器有更好的效率。

同样的，非线性求解器的选择也依赖分析类型。一般情况下，拟牛顿方法更适合高度非线性问题，但它需要更多的内存，每次迭代需要的计算成本也更大。

21.4 准静态分析

进行准静态分析（/IMPL/QSTAT 时），由于引入了惯性矩阵，刚度矩阵的正定性得到加强。附加刚度矩阵是质量、惯量和时间步长的函数，时间步长越小，附加的刚度越大。另外，可以使用关键字/IMPL/QSTAT/DSCAL 对这个附加矩阵定义一个缩放因子（这个缩放因

子与这个附加矩阵是反比关系，与时间步长一样）。对于非线性分析，这将只改变收敛速度。而对于线性分析，时间步应该谨慎选择：时间步不能太小，这将显著改变结果，时间步也不能太大，可能导致矩阵成为非正定矩阵。

对于模型的 PART 主要是通过接触界面进行连接的模型，且其他分析类型又不奏效时，使用准静态分析是合适的。线性准静态分析也能够用于高度非线性（比如显式分析）的模型检查，只要使用不太大的步长，无论模型是否有足够的约束，总是能够得到一个结果。

如前文提到，当关键字/IMPL/QSTAT/DTSCAL 和/IMPL/LINEAR/INTER（两个线性步）一起使用时，缩放因子将仅施加在第二个线性步里。通过选择一个合理的缩放因子和终止时间，可以在第一个线性步里获得正确的接触，并使得最后一步的误差最小。一个典型的例子就是含假人整车模型在重力下的应力初始化，假人与车体模型仅通过接触发生连接，可以定义一个很小的终止时间，这样在第一个线性步的接触搜索过程里所有的 PART 就不会有大位移发生，而在第二个线性步里使用一个大的准静态缩放因子以获得静态解。

21.5 非线性分析

在非线性分析中，当单元公式与刚度矩阵构建和内力计算（与显式求解一样）不同时，极易遇到收敛问题，尤其是使用减缩积分单元公式和摄动沙漏控制时。同时，类似与 QEPH 和 QBAT 类型 Shell 单元，HA8、S8 和 HEPH 类型的 Solid 单元，通常还是可以得到收敛结果。当然，推荐直接使用上述单元类型。

如前所述， RADIOSS Block 隐式求解时仅使用材料的弹性参数用于生成刚度矩阵，这样使得所有材料类型都可以用于隐式分析。使用弹性刚度矩阵的另外一个好处是有可能避免包含弹塑性材料导致的收敛问题。一次测试的例子表明，对于非线性材料的计算，使用弹性刚度矩阵和线性搜索能够得到非常合理的结果。使用材料弹性部分属性的例外是弹簧单元不与任何材料发生关联。对于隐式非线性分析里使用了非线性特性的弹簧，将计算其初始切线刚度矩阵，但是为了避免非线性分析的收敛问题，弹性刚度矩阵将仍然使用弹塑性（H>0）。如果弹簧单元被用于线性分析，且其刚度特性被定义为非线性行为，则线性刚度将从其非线性特性曲线的第一点（除了点（0，0））求得。

收敛问题是非线性分析最常遇到的，影响收敛的根源大部分在于控制参数。事实上，这些参数一般都是与具体问题相关的，并决定了模型的求解能否收敛，而且最佳的控制参数值往往是求解精度和效率的折中。

首次按需要定义控制隐式求解器的参数，卡片如下：

/IMPL/NONLIN/n
L_A　　I_{tol}　　*Tol*

其中，*n* 值表示选用的求解器：*n*=1 是改进的牛顿法，*n*=2 是拟牛顿法（BFGS）；*L_A* 是重组刚度矩阵最大迭代次数，对于迭代求解器建议取 3，对于直接求解器或混合求解器建议取 6；I_{tol} 是求解结束准则，1 为相对残余能量，2 为相对残余力；*TOL* 是容差，相对参与量（参与量除以参考值）等于或小于这个容差，则认为迭代收敛。参考值在零迭代时计算，并被打印到输出信息里。更新刚度矩阵的主要意义在于几何构形的更新（对于非线性的材料使用了弹性参数），因此，根据位移增量的大小，使用一个较小的 *L_A* 值会是收敛速度加

快，但是这将增加重组刚度矩阵的计算消耗，尤其是使用直接求解时。通常使用力准则（默认设置）会得到较好的结果，能量准则可能收敛得更容易——适用于单调递增载荷下弹塑性材料的模拟。

其次，需要使用关键字/IMPL/DT/n 和 /IMPL/DTINI 定义时间步长控制。

如果没有定义时间步长控制方法，非线性分析中将使用恒定的时间步长进行计算，但不推荐这样做。为了有效管理时间步长，有两个自动控制方法可选（*n*=1，2）。第一种方法是线性搜索方法，仅根据收敛迭代次数控制；第二种方法是弧长法，类似位移控制方法。一般推荐使用第二种方法。当使用自动时间步长控制时，在每一时间步（循环），RADIOSS 求解器将根据输入的缩放因子自动调整时间步长。如果该迭代发散，RADIOSS 将缩减时间步长进行重新迭代。默认的缩放因子是 0.67（减小因子）和 1.1（增大因子）。使用接近为 1 的最大增大因子，比如 1.01，可能会使某些困难的分析（如屈曲）更容易收敛。

关键字/IMPL/DTINI 所确定的初始时间步长大致反映出了问题的求解步数，通常对于非线性模拟，需要有足够数量（>100）的时间步：几何非线性或接触非线性使用较小的时间步更容易收敛，某些材料行为，尤其是与路径相关的材料行为，需要很小的时间步进行精确积分。

关键字/IMPL/DT/STOP 对于控制总的求解时间和效率非常有用，DT_min 参数确定了计算所容忍的最小时间步长，一旦时间步长小于该值，计算将被停止。DT_max 确定了最大时间步长，一旦时间步长到达该值，计算不会停止，但这个选项对于高度非线性的问题的模拟有用，同时还可以控制必要的输出间隔。

重启动分析在隐式求解里也是允许的，此时可以定义不同参数以达到相应的收敛策略。

21.6　RADIOSS Block 隐式分析 Engine 文件示例

本节给出两个隐式分析使用的典型 Engine 文件。

线性静态分析如下：

```
# RADIOSS ENGINE
/TITLE
Implicit linear computation
/RUN/ROOTNAME/1
1.01
/VERS/51
/TFILE
0.001
/PROC/1
/PRINT/-1
/ANIM/DT
0. 1.
/ANIM/VECT/DIP
/ANIM/MASS
/ANIM/ELEM/VONM
/MON/ON
```

```
# Linear solver method(PCG):
/IMPL/SOLVER/1
# Iprec It_max Itol Tol
5 0 3 0.0
/IMPL/PRINT/LINEAR/-100
```

非线性静态分析如下：

```
# RADIOSS ENGINE
/TITLE
Implicit computation
/RUN/ROOTNAME/1
1
/VERS/90
/TFILE
0.001
/PROC/1
/ANIM/DT
0. 0.1
/ANIM/VECT/VEL
/ANIM/MASS
/ANIM/ELEM/VONM
/MON/ON
/PRINT/-1
#-----------------------------------------------------
# STATIC Non-Linear IMPLICIT OPTIONS #
#-----------------------------------------------------
# Static nonlinear computation(modified Newton method):
/IMPL/NONLIN/1
# L_a Itol Tol
5 1 0.001
# Printout frequency for nonlinear computation:
/IMPL/PRINT/NONL/-1
# Linear solver method(DIRECT BCS):
/IMPL/SOLVER/3

# Initial timestep:
/IMPL/DTINI
0.01
# Min-max values for timestep:
/IMPL/DT/STOP
# Dt_min Dt_max
1e-05 0.05
# Timestep control method 2(arc-length + line-search):
/IMPL/DT/2
# It_w L_arc L_dtn Scal_dtn Scal_dtp_max
6 0 20 0.8 1.05
```

21.7 实例教程——搭接接头隐式非线性分析实例

本教程的目的是学习使用 RADIOSS Block 模块进行隐式接触非线性分析，涉及非线性材料、接触卡片以及隐式求解控制卡片的编辑。基本模型是一个搭接接头，为减少计算量，模型只取对称结构的一半进行分析，如图 21–1 所示。

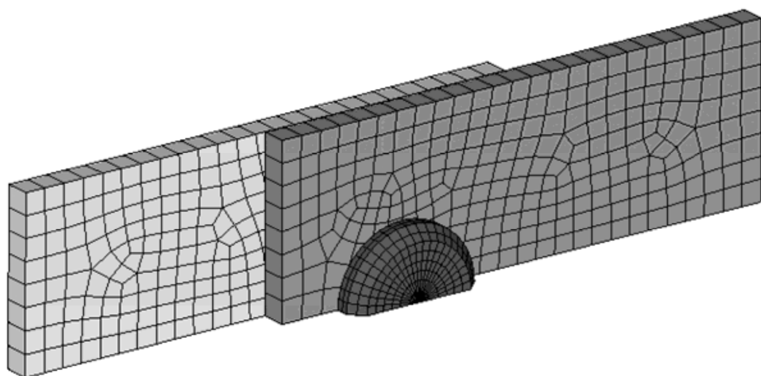


图 21–1 搭接接头模型

本教程中包含以下内容的学习：

（1）非线性材料的创建。

（2）接触的定义。

（3）非线性隐式控制卡片的创建。

（4）计算结果的查看。

STEP 01 导入网格

（1）打开 HyperMesh，并选择 User profile 为 RADIOSS Block100，单击 OK。

（2）单击 Import 按钮，在 Import 面板下选择“导入 FE 模型”按钮，如图 21–2 所示。

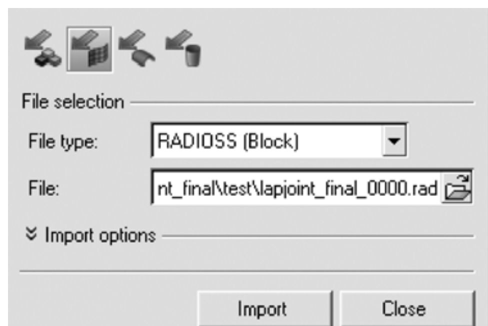


图 21–2 导入 FE 模型

（3）单击“打开文件”按钮，在相应的目录路径<install_directory>/tutorials/hwsolvers/RADIOSS/下，选择模型文件 lapjoint_final_0000.rad，单击 Ipmort。

STEP 02 创建弹塑性材料

（1）单击菜单 XYplots→curve edit，打开曲线编辑面板，单击右下角的 NEW 按钮，增加一条新的曲线，输入曲线的名称为 Aluminum，并单击 Proceed，返回曲线编辑器。

（2）单击曲线编辑器左边数据输入区，并分别在 X，Y 相应的部分输入如图 21−3 所示的数据，定义 aluminum 材料曲线。

X	Y
0.0	350.0
0.001	368.71
0.002	376.5
0.005	391.98
0.008	403.15
0.011	412.36
0.015	422.87
0.025	444.17
0.035	461.5
0.07	507.9
0.15	581.5
0.25	649.17
0.35	704.22
0.45	751.85
0.5	773.68
0.55	794.4
0.6	814.28

图 21−3　输入 X 和 Y 对应的数据

（3）输入完毕后单击左下角的 Updata，更新数据，在曲线显示区会看到创建的曲线，如图 21−4 所示。

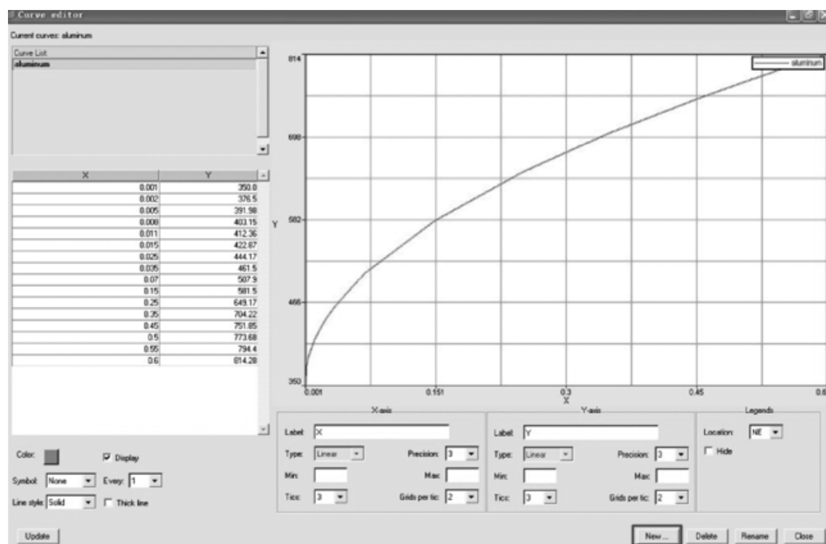


图 21−4　更新数据曲线

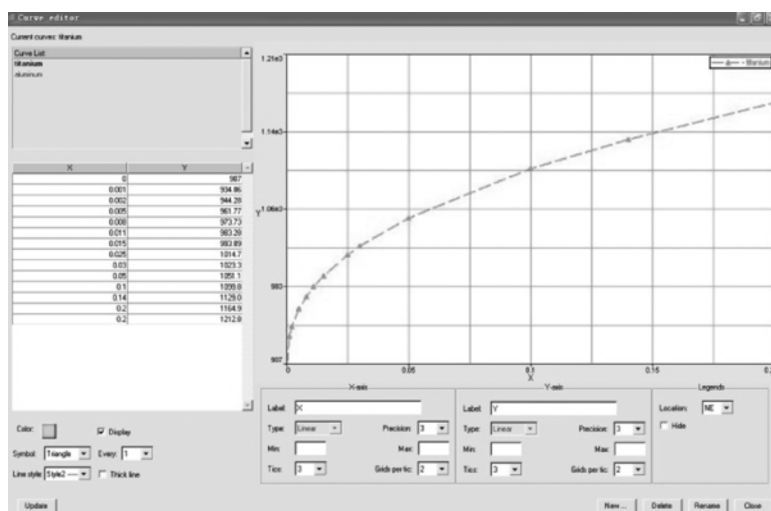
（4）重复上述步骤（1）～（3），创建材料 titanium 的材料曲线。

（5）曲线创建完毕后如图 21−5 所示。

（6）在 Model 选项卡中，用鼠标右键单击 create→material，弹出材料创建窗口，选择如图 21−6 所示的材料类型以及卡片，并勾选 card edit material upon creation，单击 Create。

X	Y
0.0	907.0
0.001	934.86
0.002	944.28
0.005	961.77
0.008	973.73
0.011	983.28
0.015	993.89
0.025	1014.7
0.03	1023.3
0.05	1051.1
0.1	1099.8
0.14	1129.0
0.2	1164.9
0.3	1212.8

a)



b)

图 21-5　创建 tiatanium 的数据曲线

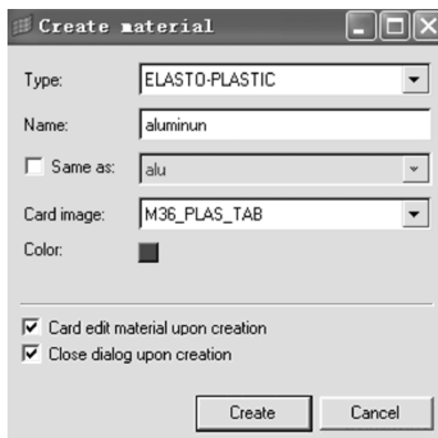


图 21-6　创建材料

（7）在弹出的卡片编辑器中输入如图 21−7 所示的材料信息。

[Rho_Initial]				
1.200e-09				
[E]		[nu]	[EPS_max]	[EPS_t1]
71700.000		0.330		
[N_func]	[Fsmooth]	[C_hard]	[Fcut]	[Epsilon_F]
1	0	0.000		

图 21−7　输入材料信息

（8）单击左边的下拉箭头，单击 l_func1 按钮两次，选择前面创建的材料曲线函数 aluminum，再单击 return。

（9）重复上述步骤（6）～（8），创建材料 titanium，材料相应参数如图 21−8 所示，并在 l_func1 中选择曲线 titanium。

[Rho_Initial]				
1.200e-09				
[E]		[nu]	[EPS_max]	[EPS_t1]
71700.000		0.330		
[N_func]	[Fsmooth]	[C_hard]	[Fcut]	[Epsilon_F]
1	0	0.000		

图 21−8　输入 titanium 的材料参数

STEP 03 创建属性

（1）在 Model 选项卡中，用鼠标右键单击 create→property，弹出材料创建窗口，选择如图 21−9 所示的材料类型以及卡片，并勾选 card edit material upon creation，单击 Create。

Create property
Property
Type: VOLUME
Name: ASSEMBLY_RIVET-BOT_PALTE
Same as: ASSEMBLY_RIVET-1_RIVET
Card image: P14_SOLID
Beamsection:
Color:
Card edit property upon creation
Close dialog upon creation
Create　Cancel

图 21−9　创建属性

（2）在弹出的卡片编辑器中输入如图 21−10 所示的材料信息，单击 return。

ASSEMBLY_PLATE-BOT_PLATE
[ISOLID] [Ismstr] [Icpre]
14 4 2
Enter Number of integration points along r ,s & t Directions:(i,j,k)
[i] [j] [k] [I_rot]
2 2 2

图 21-10 输入材料信息

（3）与步骤（2）相同，创建与 ASSEMBLY_PLATE-BOT_PLATE 相同的 Property：ASSEMBLY_PLATE-TOP_PLATE。

（4）与步骤（3）相同，创建属性 ASSEMBLY_RIVET-1_RIVET，其卡片信息如图 21-11 所示，单击 return。

ASSEMBLY_RIVET-1_RIVET
[ISOLID] [Ismstr] [Icpre] [I_rot]
24 4 2
[qa] [qb] [h]

图 21-11 卡片的信息

STEP 04 更新 Component 属性与材料

（1）单击工具栏中的 component 按钮，并选择 updata 面板。单击 comps ，并选择 ASSEMBLY_PLATE-BOT_PLATE，单击 card image=，选择 part；单击 property=，选择 ASSEMBLY_PLATE-BOT_PLATE；单击 material=，选择 aluminum，如图 21-12 所示，单击 update。

create comps update
update color update/edit
assign card image = Part
property = ASSEMBLY_PLATE-BOT_PLATE create prop
card image = P14_SOLID create mat
material = aluminum reset
card image = M36_PLAS_TAB return

图 21-12 更新 Part 材料属性

（2）使用同样的方法更新 ASSEMBLY_PLATE-TOP_PLATE 属性与材料，如图 21-13 所示。

create comps update
update color update/edit
assign card image = Part
property = ASSEMBLY_PLATE-TOP_PLATE create prop
card image = P14_SOLID create mat
material = aluminum reset
card image = M36_PLAS_TAB return

图 21-13 更新 Part 材料属性

（3）使用同样的方法更新 ASSEMBLY_RIVET-1_RIVET 属性与材料，如图 21-14 所示。

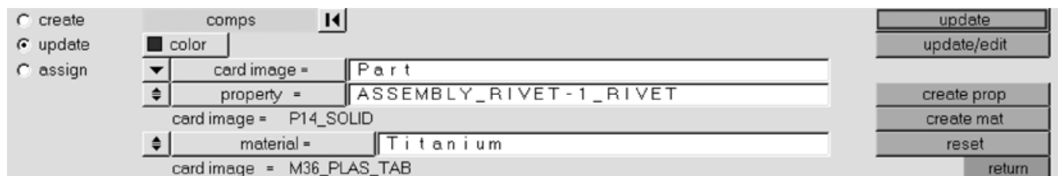


图 21-14　更新 Part 材料属性

STEP 05 创建 Load Collector

（1）选择 Analysis 面板，并进入 Entity Sets 面板，在 name= 中输入 ASSEMBLY_FIX，card image 选择 GRNOD，其余参数设置如图 21-15 所示。

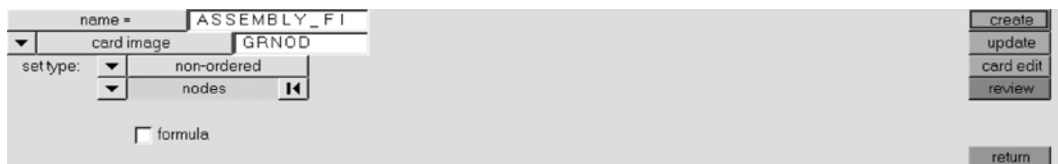


图 21-15　进入 Entity Sets 面板

（2）选择如图 21-16 所示中的节点创建节点集合，单击 Create。

（3）用上述方法，创建节点集合 ASSEMBLY_PULL，节点选择如图 21-17 所示的节点。

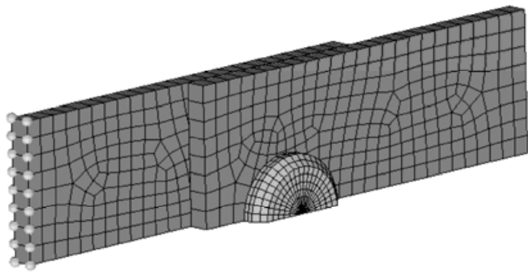


图 21-16　选择节点创建节点集合

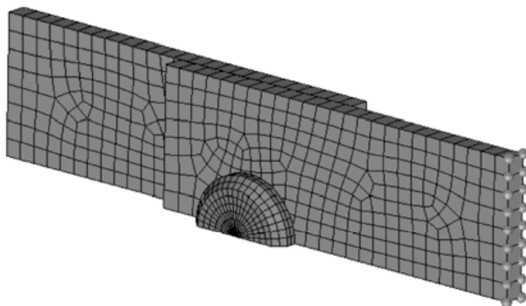


图 21-17　创建节点集合

（4）用上述方法，创建节点集合 ASSEMBLY_SYMM，节点选择如图 21-18 所示的节点。

（5）用上述方法，创建节点集合 ASSEMBLY_CORNER，选择如图 21-19 所示的节点。

（6）在 Model 选项卡中，用鼠标右键单击 create→Load Collector，弹出 LoadCollector 创建窗口，输入如图 21-20 所示的信息，并勾选 card edit material upon creation，单击 Create 后编辑卡片。

（7）单击 Gmod_id，选择前面创建的节点集合 ASSEMBLY_FIX，注意勾选自由度约束选项 Translation_Vx，如图 21-21 所示。

（8）用上述方法，分别对节点集合 ASSEMBLY_SYMM 和 ASSEMBLY_CORNER 创建 Load Collector——SYMM 和 CORNER，卡片信息如图 21-22 所示。

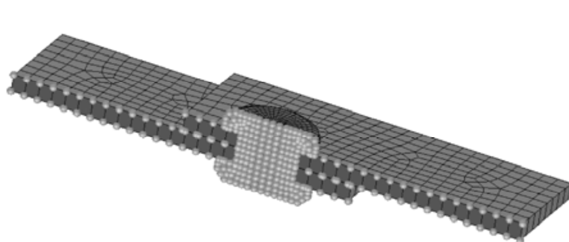


图 21–18　创建节点集合

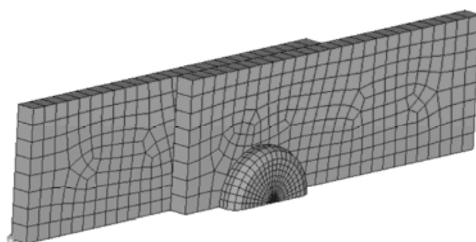


图 21–19　创建节点集合



图 21–20　创建 Load Collector

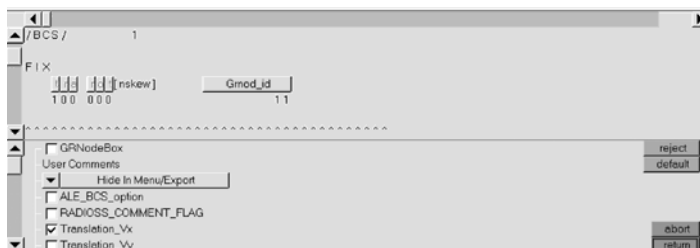
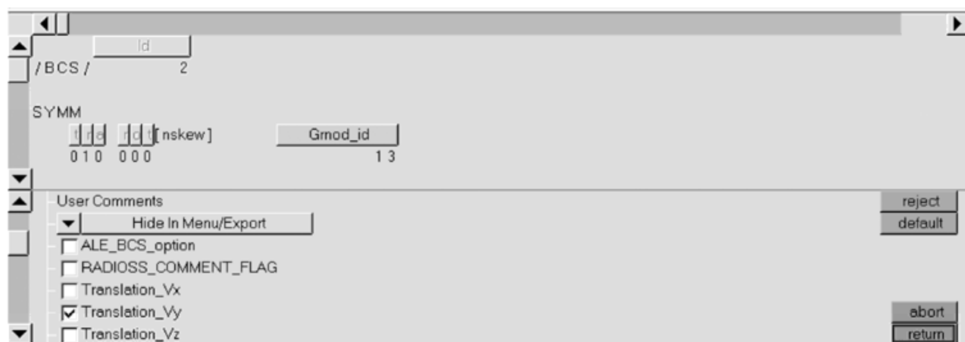


图 21–21　勾选 Translation Vx



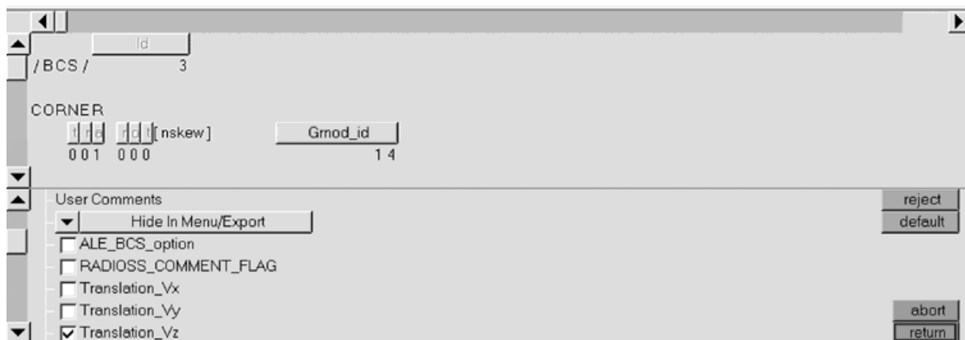


图 21–22　创建节点集合

STEP 06 创建强制位移

（1）同 STEP02 中创建材料曲线相同，在 Curve Editor 中单击 NEW 增加一条新曲线，曲线名称为 IMPDISP，曲线点信息如图 21–23 所示。

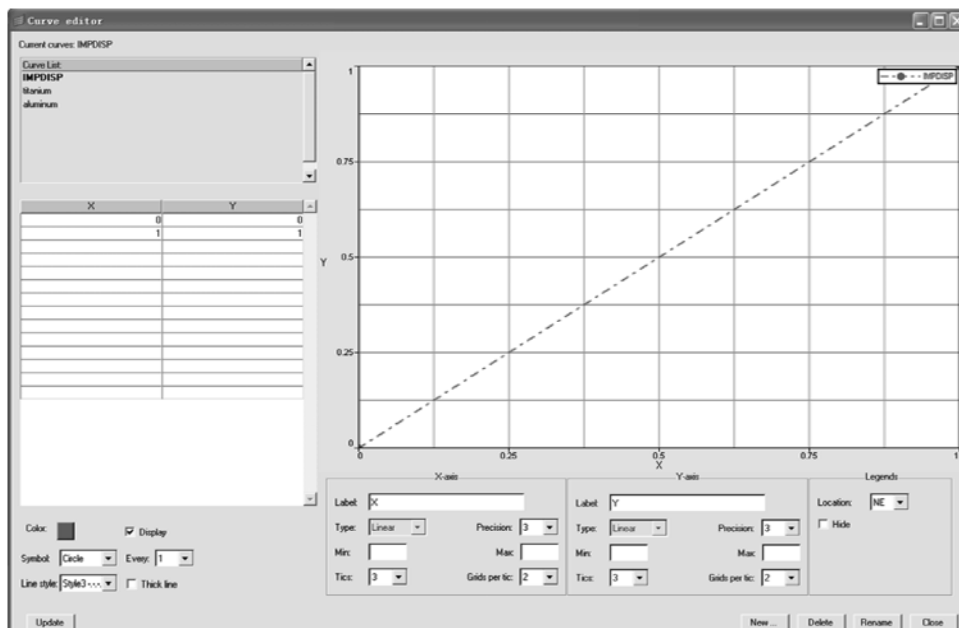


图 21–23　创建曲线

（2）在 Model 选项卡中，用鼠标右键单击 create→Load Collector，弹出 Create LoadCollector 创建窗口，信息输入如图 21–24 所示。

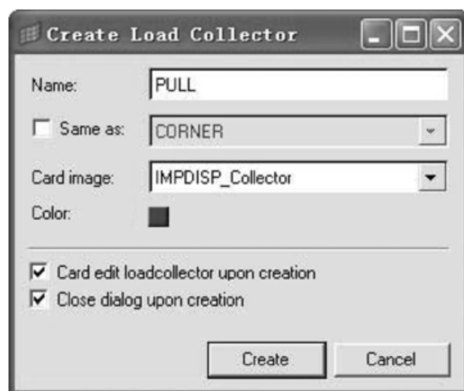


图 21–24　创建 Load Collector

（3）在卡片编辑中输入如图 21–25 所示的信息，其中 lfunct 为前面创建的位移曲线，Gmod_id 为前面创建的节点集合 ASSEMBLY_PULL，单击 return。

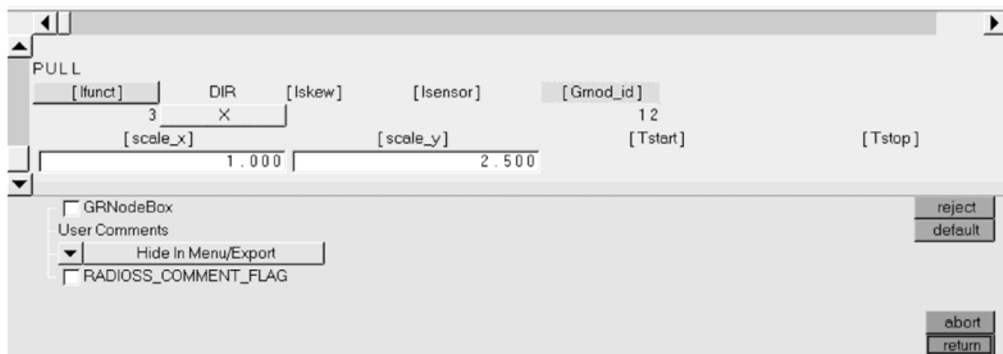


图 21-25　输入参数

STEP 07 创建接触

（1）进入 Analysis 面板，选择 Entity Sets 面板，在 name=中输入 GrnodPartForInterfaceId_5，Card image 选择 GROND，如图 21-26 所示，选择模型中所有节点后，单击 create。

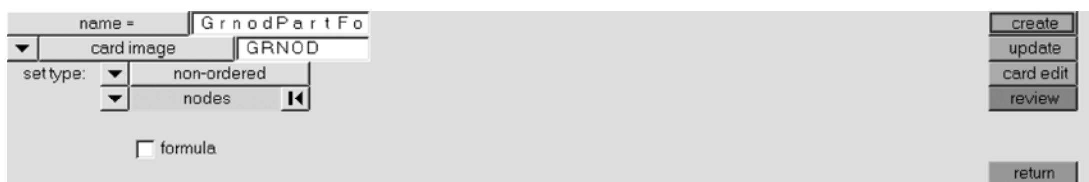


图 21-26　创建接触

（2）在 name=中输入 SurfPartForInterfaceId_5，Card image 选择 SURF_EXT，如图 21-27 所示，单击 comps，选择所有的 components，单击 select，单击 create，再单击 return。

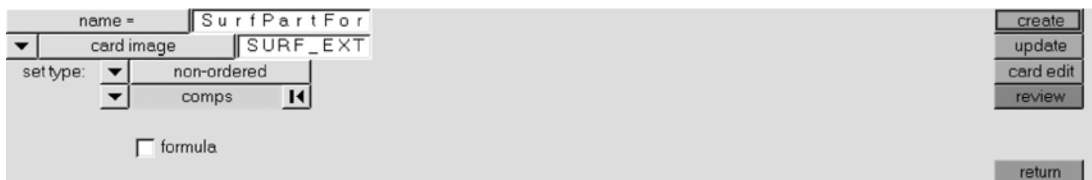


图 21-27　创建 SURF_EXT

（3）进入 interface 面板，选择 create，在 name= 中输入 Type 7，单击 type=，选择 TYPE7，如图 21-28 所示。

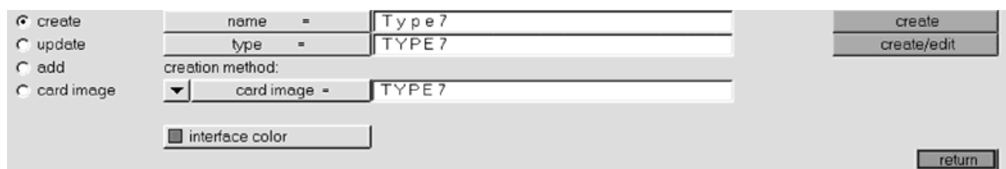


图 21-28　创建 Type 7 的 interface

（4）单击 create/edit，进入卡片编辑，如图 21−29 所示。

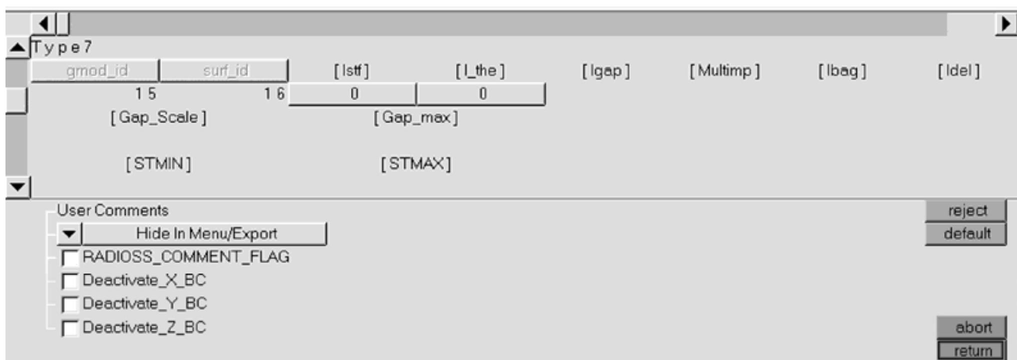


图 21−29　Type 7 的卡片编辑界面

（5）单击 lstf，选择 0；单击 l_the，选择 0，单击左边的下拉箭头，单击 FRIC 与 GAPmin，并输入如图 21−30 所示的数据。

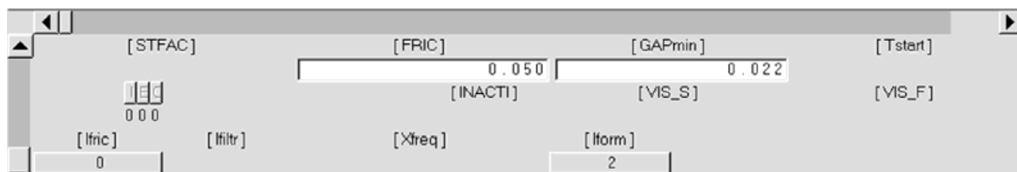


图 21−30　输入参数

（6）单击 lfric，选择 0；单击 lform，选择 2，单击 return。

（7）单击 add，进入 add 面板，并选择 master 与 slave 类型都是 sets，如图 21−31 所示。

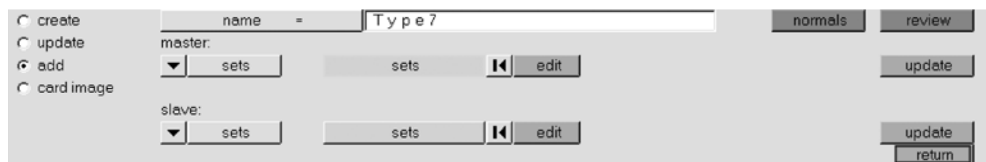


图 21−31　进入 add 面板

（8）单击 master 所属的 sets，选择前面创建的节点集合 SurfPartForInterfaceId_5，单击后面的按钮 update 对接触对的主面进行更新；单击 slave 后面的 sets，并选择前面创建的节点集合 GrnodPartForInterfaceId_5，单击后面的按钮 update 对接触对的从节点进行更新。

（9）单击 review 按钮，可以查看创建的接触，如图 21−32 所示。

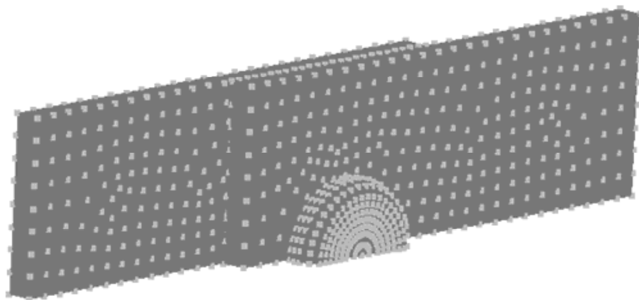


图 21−32　预览创建的接触

STEP 08 创建求解控制文件（Engine File）

（1）两种方式进入 RADIOSS Engine：

1）进入 analysis 面板，单击 RADIOSS 按钮，进入 RADIOSS 求解面板，如图 21−33 所示，单击右下角的“引擎文件创建”按钮 engine file 。

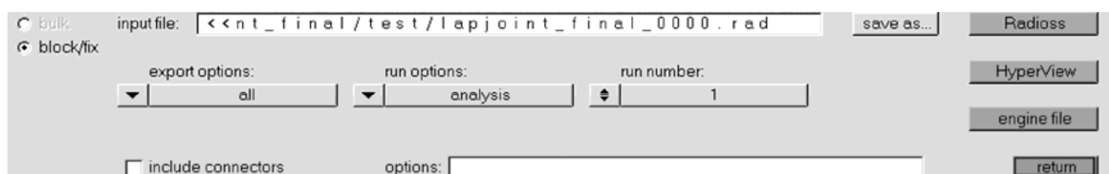


图 21−33 进入 analysis 面板

2）进入 Utility 面板，选择 Engine File。

（2）以上述两种方式中的任意一种，进入 Engine File 编写窗口，如图 21−34 所示。

（3）在 GENERAL 面板下输入相应的信息，如图 21−35 所示。

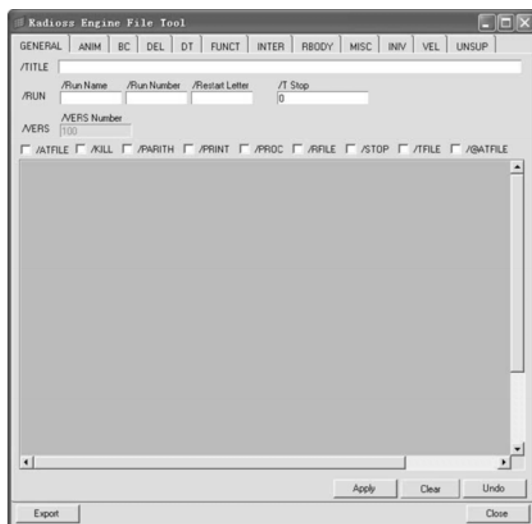


图 21−34 Engine File 编写窗口

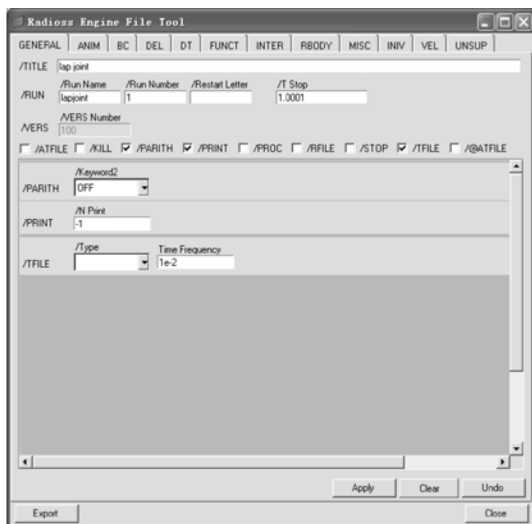


图 21−35 GENERAL 面板填写相应信息

（4）在 ANIM 面板下输入相应的信息，如图 21−36 所示。

（5）在 MISC 面板下勾选/MOD，并选择 ON，如图 21−37 所示。

（6）在 UNSUP 面板下输入隐式计算控制信息，如图 21−38 所示。

（7）单击 Apply，单击 Close。

STEP 09 求解计算

（1）进入 Analysis 面板，单击 RADIOSS，进入 RADIOSS 求解面板，如图 21−39 所示。

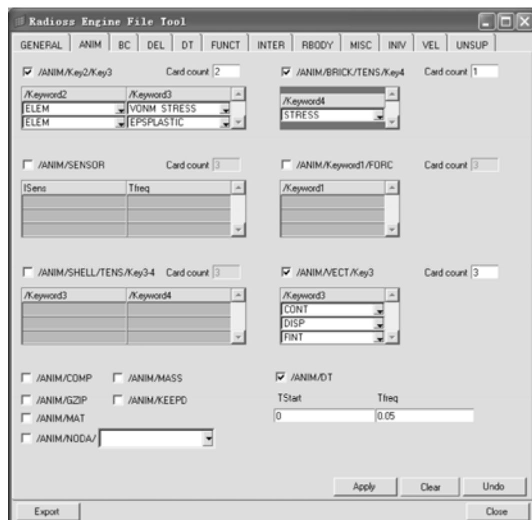


图 21–36　在 ANIM 面板中输入相应的信息

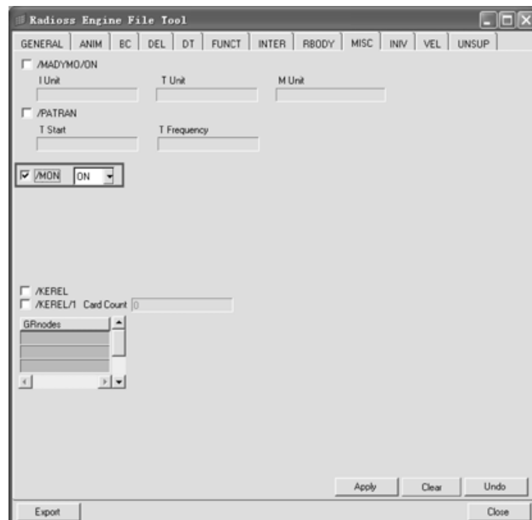


图 21–37　在 MISC 面板中输入相应的信息

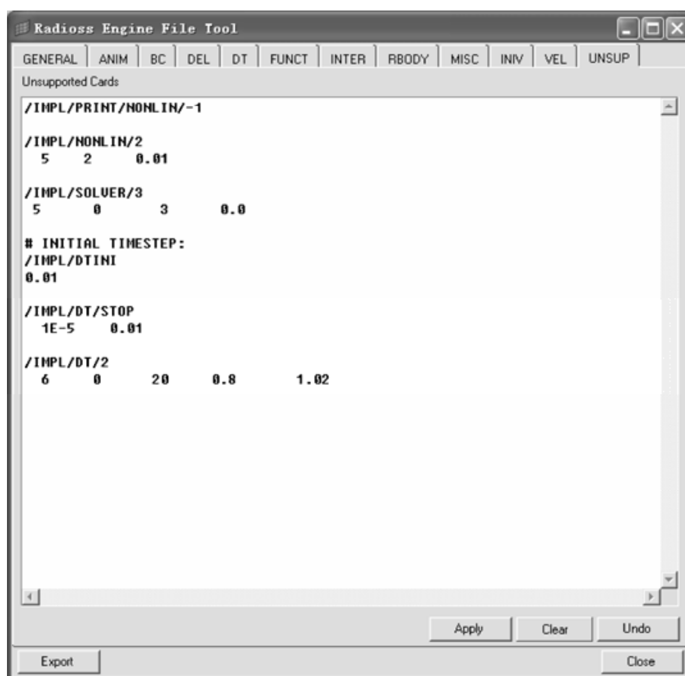


图 21–38　在 UNSUP 面板中输入相应的信息

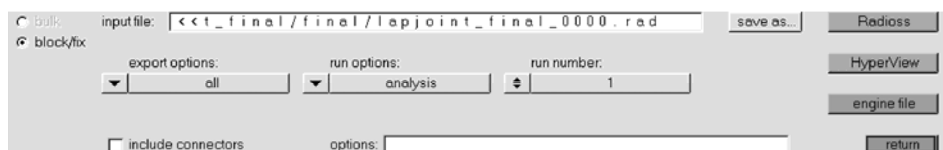


图 21–39　进入 RADIOSS 求解面板

（2）单击 Save as，将文件保存到相应的目录下，注意文件名称后面必须是 _0000.rad。

（3）单击 RADIOSS，递交计算。

（4）在计算前首先对模型进行检查，检查通过后再进入求解程序。计算结束后 DOS 窗口中会出现 NORMAL TERMINATION，证明计算完成。

STEP 10 查看计算结果

（1）求解结束后，单击 RADIOSS 面板下的 HyperView 按钮，HyperView 自动导入计算得到的结果如图 21−40 所示。

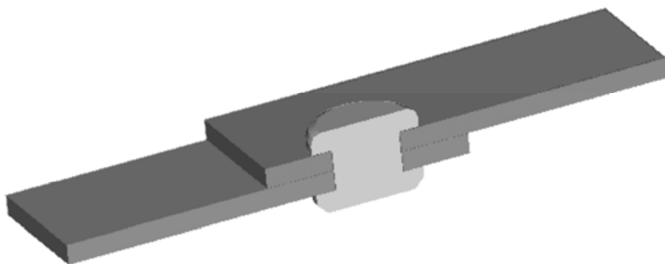


图 21−40　查看结果

（2）单击 Counter 按钮，查看各个结果的应力云图，此处以查看接触力（Contact force）为例，将面板内信息设置如图 21−41 所示，单击 Apply，结果如图 21−42 所示。

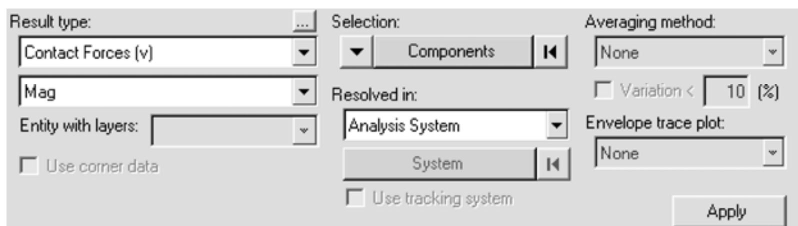


图 21−41　面板设置

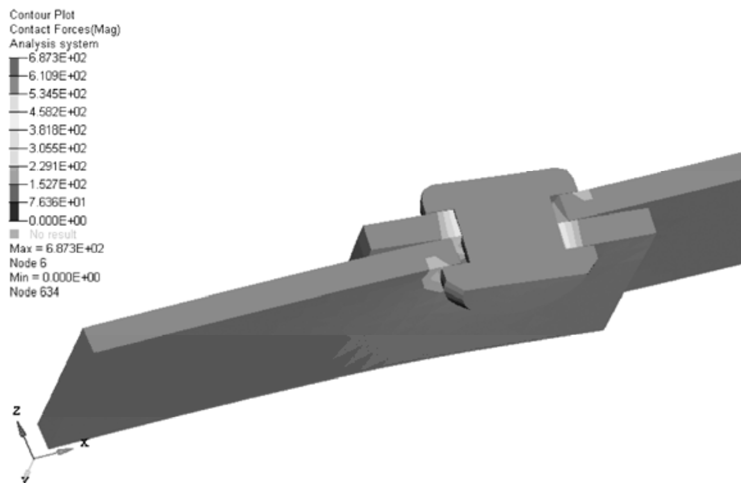


图 21−42　结果云图

21.8 本章小结

本章介绍了 RADIOSS Block 隐式分析的基本功能、隐式求解器，以及如何激活隐式求解。对于准静态分析和非线性问题进行了展开介绍，对如何选择求解器以及各控制参数意义进行了解释，并给出了典型的用于隐式求解的 Engine 文件示例。本章的实例教程涉及非线性材料和接触问题，这些设置可以被读者借鉴到实际问题中。

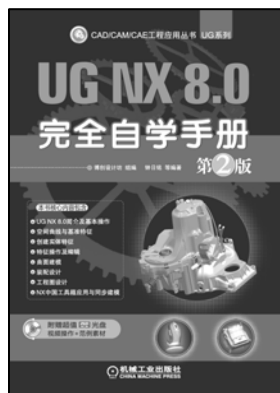
CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

打造 CAD 图书领域的“中国制造”

丛书特色

- **历久弥新**：为响应国家“两化融合”的号召，机工社历经十年倾力打造本系列丛书，丛书每年重印率达 90%、改版率达 50%，已成为国内 CAD 图书领域的最经典套系之一。
- **专业实用**：丛书内容涉及机械设计、有限元分析、制造技术应用、流场分析、建筑施工图、室内装潢图、水暖电布线图和建筑总图等，可以快速有效地帮助读者解决实际工程问题。
- **品种丰富**：本丛书目前动销品种近 200 种，产品包含了 CAX 领域全部主流应用软件和应用领域，包括 AutoCAD，UG，Pro/E，MATLAB，SolidWorks，HyperWorks，ANSYS，Mastercam，Inventor 等。
- **经典畅销**：经典畅销书层出不穷，累计销售过万册的品种达数十种。像《AutoCAD 室内装潢设计》、《UG NX 7.5 完全自学手册》、《Pro/ENGINEER Wildfire5.0 从入门到精通》、《ANSYS 结构分析工程应用实例解析》等书整体销量已过 3 万册。
- **配套资源丰富**：几乎每本书都提供配有书中实例素材、操作视频、PPT 课件等资源，方便读者的理解和学习，以达到事半功倍的效果。
- **金牌作者云集**：拥有一大批行业专家和畅销书作者，如唐湘民、韩凤起、钟日铭、江洪、张朝晖和张忠将等。

丛书介绍



书名：UG NX 8.0完全自学手册 第2版

书号：978-7-111-38414-4

作者：钟日铭 等

定价：75.00元

★本书以UG NX 8.0中文版为软件操作基础，结合典型范例循序渐进地介绍NX 8.0中文版的软件功能和实战应用知识。本书知识全面、实用，共分9章，内容包括UG NX 8.0入门简介及基本操作、草图、空间曲线与基准特征、创建实体特征、特征操作及编辑、曲面建模、装配设计、工程图设计、UG NX中国工具箱应用与同步建模。



书名：SolidWorks 2011机械设计完全实例教程

书号：978-7-111-36514-3

作者：张忠将 等

定价：62.00元

★本书紧密结合实际应用，以众多精彩的机械设计实例为引导，详细介绍了SolidWorks从模型创建到出工程图，再到模型分析和仿真等的操作过程。本书实例涵盖典型机械零件、输送机械、制动机械、农用机械、紧固和夹具、传动机构和弹簧／控制装置等的设计。



书名：HyperMesh&HyperView应用技巧与高级实例

书号：978-7-111-39535-5

作者：王钰栋 等

定价：99.00元

★本书分两部分，前一部分主要介绍HyperMesh有限元前处理软件，包括HyperMesh的基础知识、几何清理、2D网格划分、3D网格划分、1D单元创建、航空应用和主流求解器接口介绍，还包括关于HyperMesh的用户二次开发功能。后一部分主要介绍HyperView、HyperGraph等有限元后处理软件，包括用HyperView查看结果云图、变形图、结果数据、创建截面、创建测量点、报告模板等，用HyperGraph建立数据曲线、曲线的数据处理和三维曲线曲面的创建、处理等。



书名：奥宾学院大师系列：AutoCAD MEP 2011

书号：978-7-111-39432-7

作者：[美]Paul F. Aubin 等著；王申 等译

定价：129.00元

★本书是目前国内针对 AutoCAD®MEP 软件介绍、应用举例的权威用书，深入浅出地阐述了 AutoCAD®MEP 2011 的各项功能，对 AutoCAD MEP 软件的工作方法、基本原理和操作步骤进行了详细的介绍，并通过项目样例系统地介绍了如何使用该软件进行水、暖、电设计，更简明扼要地展示了如何进行各专业之间的协同。本书还特别介绍了如何创建各种类型的内容构件，字里行间的提示和小技巧亦是本书亮点之一，这些知识点均由本书作者通过积累多年的实战经验总结而成，为广大读者的实践旅程提供了捷径。

转

机工出版社 · 计算机分社书友会邀请卡

尊敬的读者朋友：

感谢您选择我们出版的图书！我们愿以书为媒与您做朋友！我们诚挚地邀请您加入：

“机工出版社 · 计算机分社书友会”

以书结缘，以书会友

加入“书友会”，您将：

★ 第一时间获知新书信息、了解作者动态；

★ 与书友们在线品书评书，谈天说地；

★ 受邀参与我社组织的各种沙龙活动，会员联谊；

★ 受邀参与我社作者和合作伙伴组织的各种技术培训和讲座；

★ 获得“书友达人”资格（积极参与互动交流活动的书友），参与每月 5 个名额的“书友试读赠阅”活动，获得最新出版精品图书 1 本。

如何加入“机工出版社 · 计算机分社书友会”

两步操作轻松加入书友会

Step1

访问以下任一网址：

★ 新浪官方微博：http://weibo.com/cmpjsj

★ 新浪官方博客：http://blog.sina.com.cn/cmpbookjsj

★ 腾讯官方微博：http://t.qq.com/jigongchubanshe

★ 腾讯官方博客：http://2399929378.qzone.qq.com

Step2

找到并点击调查问卷链接地址（通常位于置顶位置或公告栏），完整填写调查问卷即可。

联系方式

通信地址：北京市西城区百万庄大街 22 号
机械工业出版社计算机分社
邮政编码：100037

联系电话：010-88379750
传　　真：010-88379736
电子邮件：cmp_itbook@163.com

敬请关注我社官方微博： http://weibo.com/cmpjsj

第一时间了解新书动态，获知书友会活动信息，与读者、作者、编辑们互动交流！

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

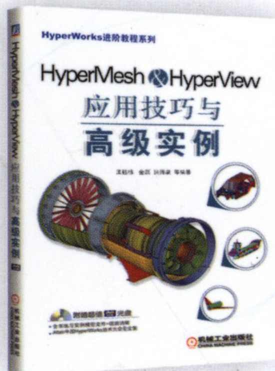
内容简介

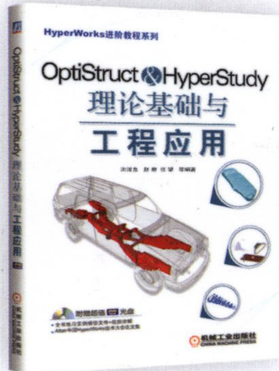
本书主要介绍了RADIOSS的理论方法、基础练习、使用技巧和工程应用。

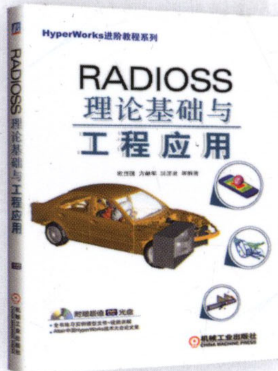
本书的主要内容包括RADIOSS有限元求解器介绍、线性静力分析、非线性静力分析、线性屈曲分析、RADIOSS惯性释放分析、模态分析、频率响应分析、瞬态响应分析、响应谱分析和随机振动分析、热–热力耦合分析、疲劳分析、NVH分析、RADIOSS Block概述、显式非线性基本理论、常用单元类型、材料与失效模型、运动约束、接触、气囊模型、SPH和ALE求解流固耦合问题、RADIOSS Block隐式分析。

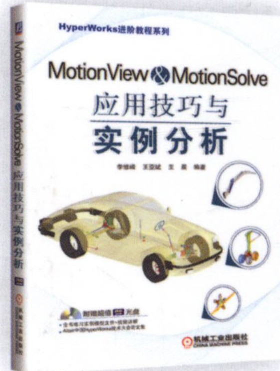
本书由Altair中国公司技术团队编写，是Altair中国公司推荐的HyperWorks软件培训用书，适合机械、汽车、航空航天、船舶、军工、重型装备、电子及家电等相关行业工程技术人员的自学或参考，也可作为理工院校相关专业师生学习或者教学用书。

HyperWorks进阶教程系列









地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-41577-0
策划编辑◎丁 诚 张淑谦 / 封面设计◎





定价：99.00元（含1DVD）